Untersuchungen an Meßtransformatoren.

Von

Dipl.-Ing. Georg Keinath.

Von der Kgl. Technischen Hochschule München zur Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs) genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: **Prof. G. Ossanna.**
Referent: **Prof. Dr. C. Heinke.**
Korreferent: **Prof. Leo Kadrnozka.**

München 1909.
Dr. Wild'sche Buchdruckerei Gebr. Parcus.

Untersuchungen an Meßtransformatoren.

Von

Dipl.-Ing. Georg Keinath.

Von der Kgl. Technischen Hochschule München zur Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs) genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: **Prof. G. Ossanna.**
Referent: **Prof. Dr. C. Heinke.**
Korreferent: **Prof. Leo Kadrnozka.**

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

München 1909.
Dr. Wild'sche Buchdruckerei Gebr. Parcus.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555409_0097

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung 5
II. Theoretische Untersuchungen 8
1. Stromwandler 10
2. Spannungswandler 18
III. Einfluß der Transformation auf Leistungsmessungen . . 23
1. Stromwandler 23
a) Einfluß der Phasenverschiebung ψ 23
b) Einfluß von p und ψ gleichzeitig 26
2. Spannungswandler 28
3. Transformation von Strom und Spannung gleichzeitig 29
IV. Experimentelle Untersuchungen 31
1. Ermittlung von p und ψ bei Stromwandlern 31
2. Ermittlung von p und ψ bei Spannungswandlern 42
3. Kurvenaufnahmen bei Stromwandlern 49
4. Kurvenaufnahmen bei Spannungswandlern 61
5. Ermittlung der für die Vorausberechnung von p und ψ notwendigen Größen μ, φ, δ 64
a) Leerlaufversuch (μ, φ) 65
b) Kurzschlußversuch (δ) 74
V. Vergleich der experimentell ermittelten Werte von p und ψ mit den berechneten Werten 85
1. Stromwandler 85
2. Spannungswandler 91
VI. Folgerungen für die Konstruktion 98
VII. Schlußbemerkung 103

I. Untersuchungen an Meßtransformatoren.

Die Erfindung der Transformatoren war namentlich für die Vervollkommnung der elektrischen Arbeitsübertragung von großer Bedeutung. Um das Kupfergewicht der Fernleitung und damit das Anlagekapital gering zu machen, mußten immer höhere Übertragungsspannungen verwendet werden. Für Gleichstromübertragungen erwächst damit eine Reihe von Schwierigkeiten, die nur durch Anwendung von Spezialmaschinen (Thury-Kraftübertragungssystem) gelöst werden konnten. Schon erheblich höhere Spannungen können mit Wechselstromgeneratoren erhalten werden. Bei Spannungen von 50 000 Volt und darüber, wie sie in neuester Zeit vielfach verwendet werden, zieht man es jedoch durchweg vor, den Generator nur für eine Spannung von etwa 5000 Volt zu bauen und diese Spannung durch Transformatoren auf die Fernleitungsspannung zu bringen. Der Transformator kann ja, weil sich an ihm keine beweglichen Teile befinden, selbst für sehr hohe Spannungen viel besser isoliert werden als eine Maschine. Aber nicht nur die Spannungen, sondern auch die Stromstärken haben durch den Bau großer Zentralen mit Leistungen von 10 000 Kilowatt und darüber große Beträge erreicht.

Diese enorm hohen Spannungen und Stromstärken zu messen, hätte bei Gleichstrom durch Verwendung entsprechender Vorschaltwiderstände bezw. Nebenschlüsse keine Sehwierigkeiten. Bei Wechselstrom liegen die Verhältnisse viel ungünstiger. Abgesehen von den elektrostatischen Instrumenten gibt es für Wechselstrom keine Spannungszeiger, die einen annähernd so kleinen Stromverbrauch hätten wie die Drehspuleninstrumente. Die Hitzdrahtvoltmeter haben bis zu $0._2$ Amp. Stromverbrauch. Während also der Effektverbrauch bei 100 Volt nur 20 Watt beträgt, ist er bei 1000 Volt bereits 200 Watt,

bei 10 000 Volt gar 2 Kilowatt, ein Verlust, der schon vom wirtschaftlichen Standpunkt aus nicht zugelassen werden darf. Der Effektverbrauch von elektromagnetischen und Ferraris-Spannungszeigern ist allerdings geringer, aber für Hochspannung auch noch zu groß. Abgesehen von diesem schließlich bei großen Zentralen weniger ins Gewicht fallenden Übelstand wird man es aber unter allen Umständen vermeiden wollen, daß Schalttafelinstrumente unter hoher Spannung stehen und zu tötlichen Unglücksfällen Veranlassung geben können. Während man sich vor einiger Zeit noch damit begnügte, die Schaltbühne ganz sorgfältig von Erde zu isolieren und so wenigstens Erdschluß zu vermeiden, verwendet man in neuester Zeit zur Messung von Hochspannung fast ausschließlich Meßtransformatoren, das sind kleine Transformatoren, deren Hochspannungsseite an die zu messende Spannung gelegt wird und deren Niederspannungsseite die Meßinstrumente etc. zu betätigen hat.

Zur Messung hoher Stromstärken werden bei Wechselstrom wohl auch Nebenschlüsse verwendet wie bei Gleichstrom. Die Stromverzweigung erfolgt aber nicht mehr umgekehrt proportional den Gleichstromwiderständen, sondern den Wechselstromwiderständen. Diese sind aber von Frequenz und Kurvenform abhängig, sodaß auf diese Weise kein ganz zuverlässiges Meßresultat zu erhoffen ist. Aber nicht nur aus diesem Grund, sondern gleichfalls um die Hochspannung vom Schaltbrett fernzuhalten, wie schon erwähnt, ist es empfehlenswert, Stromtransformatoren zu verwenden. Diese werden mit ihrer primären Wicklung, die natürlich entsprechenden Querschnitt besitzen muß, in den zu messenden Stromkreis eingeschaltet, während die Sekundärseite über die Meßinstrumente kurzgeschlossen wird. Das Verhältnis der Windungszahlen ist bei den Stromtransformatoren der bekanntesten Firmen so gewählt, daß der Sekundärstrom normal etwa 5 Ampère beträgt für Primärströme von 5 bis 30 000 Ampère. Für sehr hohe Stromstärken besteht die Primärwicklung nur mehr aus einer einzigen Windung, der Stromwandler kann dann auch um die stromführende Leitung herumgebaut werden, ohne diese zu unterbrechen.

Durch die Zwischenschaltung eines Transformators zwischen Meßinstrument und der zu messenden Größe entsteht aber ein im Meßprinzip begründeter Fehler. Angenähert sollte die Spannungsumsetzung proportional, die Stromumsetzung umgekehrt proportional den Windungszahlen, die Phasenverschiebung zwischen Primär- und

Sekundärgröße 180° sein. Durch das Auftreten von Streuung, Eisenverlusten, Ohmschen Verlusten etc. wird aber dieses Umsetzungsverhältnis und die Phase des Stromes bezw. der Spannung geändert.

Zweck vorliegender Arbeit soll es sein, den genauen Zusammenhang zwischen Umsetzungsverhältnis und Phasenverschiebung und den elektrischen und magnetischen Eigenschaften des verwendeten Transformators sowie der Periodenzahl etc. des verwendeten Wechselstromes für jeden Belastungsfall zu ermitteln.

Die Anregung zu vorliegender Arbeit wurde von Herrn Professor Dr. C. Heinke gegeben, die Durchführung derselben erfolgte im Wintersemester 1908/09 am elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule München.

In der Literatur ist über Meßtransformatoren wenig zu finden. Ein größerer Aufsatz ist in der E. T. Z. 1906, Seite 208 zu lesen, ein Vortrag von Görner, der später kurz gestreift werden soll. Interessant ist die Beschreibung eines Stromwandlers, die in der E. T. Z. 1906, Seite 1167 wiedergegeben ist aus „The Electric Journal" Band III 1906, Seite 650, hinsichtlich der großen Dimensionen. Dieser Stromwandler, der für eine Spannung von 60 000 Volt bestimmt ist und 200 Amp. auf 5 Amp. herabtransformiert, hat eine Höhe von $2{,}_4$ m und wiegt ohne Ölfüllung 125 kg, letztere beträgt 235 Liter. Dabei ist die Sekundärleistung nur 40 Watt. Zum Vergleich sei erwähnt, daß die modernen Stromwandler von Siemens & Halske, Type Mtr 2 bei einer Sekundärleistung von 35 Watt und bei einer Genauigkeit des Umsetzungsverhältnisses von 1% nur 23 kg wiegen. Außer diesem Aufsatz von Görner scheinen keine nennenswerten Veröffentlichungen über dieses Thema erfolgt zu sein, insbesondere ist nirgends der Versuch gemacht worden, die im Meßprinzip liegenden Fehlergrößen rechnerisch festzulegen.*)

---

*) Anmerkung: Nach Abschluß dieser Arbeit erhielt der Verfasser noch Kenntnis von einem Aufsatz über Stromtransformatoren in „The Electrical World" vom 16. Mai 1908.

II. Theoretische Untersuchungen.

Es seien zunächst die Eigenschaften eines gewöhnlichen Transformators an Hand eines Diagrammes besprochen:

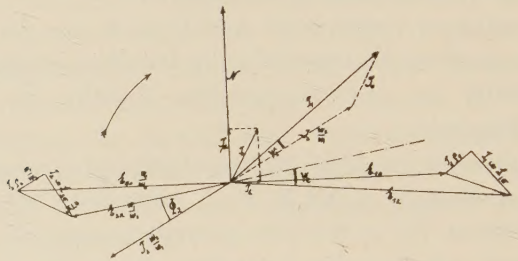


Fig. 1.

Um bei einem von „eins" verschiedenen Umsetzungsverhältnis die Sekundärgrößen annähernd gleich den Primärgrößen zu erhalten, zeichnet man das Diagramm so, daß die w_2 Sekundärwindungen durch äquivalente w_1 Primärwindungen ersetzt sind, sodaß $E_{10} = E_{20}$.

Im Diagramm bedeutet N das gemeinsame Wechselfeld, phasengleich mit dem wattlosen Magnetisierungsstrom J_μ. Beide stehen senkrecht, um 90° nacheilend zu der primären elektromotorischen Kraft E_{10}. Phasengleich mit E_{10} ist die die Eisenverluste deckende Komponente J_h des totalen Magnetisierungsstromes J_0. Die sekundäre E M K. E_{20} hinkt dem Wechselfeld N um 90° nach, also E_{10} um 180°.

Wird jetzt auf der Sekundärseite des Transformators der Strom J_2 entnommen, so hat der die Primärseite des Transformators speisende Generator den Strom $J_1 = J_2 \frac{w_2}{w_1} + J_0$ aufzubringen. (Geometrisch addiert.)

Durch die Belastung des Transformators treten Spannungsabfälle auf und zwar einmal durch den Ohmschen Widerstand ϱ der Wicklung, zum andern ist ein Spannungsverlust dadurch verursacht, daß nicht alle primär erzeugten Kraftlinien die Sekundärwicklung schneiden, sondern sich ein Teil, die Streukraftlinien, außerhalb der Wicklung schließt. Für die Rechnung wird angenommen, daß sich die Streu-

spannung E_σ wie der Ohmsche Spannungsabfall E_ϱ proportional der Strombelastung ändern:

$E_\sigma = J\,\omega\,L_\sigma$, wobei L_σ der Selbstinduktionskoeffizient des Streufeldes ist.

Wenn die Streulinien nicht mehr vollständig in Luft, sondern auch in Eisen verlaufen, stimmt diese Annahme nicht mehr, weil $L\sigma$ dann nicht mehr konstant ist. $E_{1\varrho}$ und $E_{2\varrho}$ sind in Richtung von J_1 bezw. J_2 zu zeichnen, $E_{1\sigma}$ und $E_{2\sigma}$ als rein induktive Belastung senkrecht dazu. Indem man diese Spannungsabfälle zu E_{10} addiert, bezw. von E_{20} subtrahiert, erhält man die bei der aufgedrückten primären Klemmenspannung E_{1k} verfügbare sekundäre Klemmenspannung E_{2k}. Aus der Figur ist ersichtlich, daß E_{1k} und $E_{2k}\frac{w_1}{w_2}$ sowie J_1 und $J_2\frac{w_2}{w_1}$ nach Größe und Richtung verschieden sind. Für einen idealen Transformator wäre $J_1 = J_2\frac{w_2}{w_1}$ und $E_{1k} = E_{2k}\frac{w_1}{w_2}$, die Phasenverschiebung jeweils genau 180°.

Im gezeichneten Fall ist aber die Phasenverschiebung bei den Strömen: $180^0 - \psi_i$, bei den Spannungen: $180^0 + \psi_e$.

Die Größen $J_1 - J_2\frac{w_2}{w_1}$ bezw. $E_{1k} - E_{2k}\frac{w_1}{w_2}$ sowie ψ_i und ψ_e sollen für einen Meßtransformator möglichst klein sein. Die durch Zwischenschaltung eines „idealen" Meßtransformators entstehende Phasenverschiebung von genau 180° ist für Leistungsmessungen belanglos, weil sie nur das Vorzeichen umkehrt, z. B. für $w_1 = w_2$:

$$W_1 = E_1\,J_1\cos\Phi$$
$$W_2 = E_1\,J_1\cos(180 \pm \Phi)$$
$$= -E_1\,J_1\cos\Phi$$
$$W_2 = -W_1$$

Da aber ψ im allgemeinen nicht = Null ist, so müssen die unter Verwendung von Meßtransformatoren gemessenen Leistungen außer der Berücksichtigung der Abweichung vom nominellen Umsetzungsverhältnis noch eine von der Phasenverschiebung ψ herrührende Korrektur erfahren, die außer von ψ noch von dem Leistungsfaktor im Konsumkreis abhängt. Siehe Seite 23 ff.

Nachdem wir in vorstehendem die Eigenschaften des gewöhnlichen Transformators besprochen haben, können wir im folgenden zur Behandlung der Meßtransformatoren, zunächst der Stromtransformatoren oder Stromwandler übergehen.

1. Stromwandler.

Wie schon eingangs erwähnt, ist ein Stromwandler nichts anderes als ein kurzgeschlossener Transformator. Gegeben ist der Sekundärstrom J_2, gesucht ist der Primärstrom J_1 nach Größe und Richtung.

Da man die Skalen der in Verbindung mit Meßtransformatoren gebrauchten Instrumente in der Regel so herstellt, daß sie nicht die sekundäre Meßgröße angeben, sondern die durch Multiplikation mit dem Umsetzungsverhältnis erhaltene Primärgröße, ist es wohl zweckmäßig, die Untersuchung statt für J_2 für das Korrektionsglied

$$p_i = \frac{J_1 - J_2 \frac{w_2}{w_1}}{J_2 \frac{w_2}{w_1}}$$ durchzuführen.

Ist p_i bekannt, so erhält man J_1:

$$J_1 = p_i J_2 \frac{w_2}{w_1} + J_2 \frac{w_2}{w_1} = J_2 \frac{w_2}{w_1} (1 + p_i).$$

Den genauen Wert von J_1 erhält man demnach, indem man den mit dem Umsetzungsverhältnis multiplizierten Strom J_2 noch mit dem Korrektionsfaktor $(1 + p_i)$ multipliziert.

Nachstehend (Fig. 2) ist das Diagramm für einen Stromwandler gezeichnet. Vorläufig ist vorausgesetzt, daß J_2 phasengleich ist mit E_{2k} (der Klemmenspannung), wie es z. B. bei Belastung mit Hitzdrahtampèremetern der Fall ist. Während Fig. 1 das Diagramm des unter Spannung stehenden Transformators darstellt, ist in Fig. 2 bezw. 3 der Transformator über den kleinen Widerstand r_2 kurzgeschlossen. $J_2 r_2$ und $J_2 \varrho_2$ sind als Ohmsche Spannungsabfälle in Phase mit J_2, $J_2 \omega L_{2\sigma}$ senkrecht dazu. Daraus ergibt sich das gezeichnete Dreieck mit dem $J_2 \omega L_{2\sigma}$ gegenüberliegenden Winkel δ, dessen Hypothenuse die Sekundäre E M K $= E_{20}$ ist. Die übrigen Größen, namentlich J_1, werden erhalten, wie es bereits zu Fig. 1 beschrieben ist. Da die Messungen auf der Sekundärseite erfolgen, ist es hier zweckmäßig, die primären Größen auf die sekundären zu beziehen:

statt w_1 . . . . w_2

J_1 . . . . $J_1 \frac{w_1}{w_2}$

E_2 . . . . . $E_1 \frac{w_2}{w_1}$ usw.

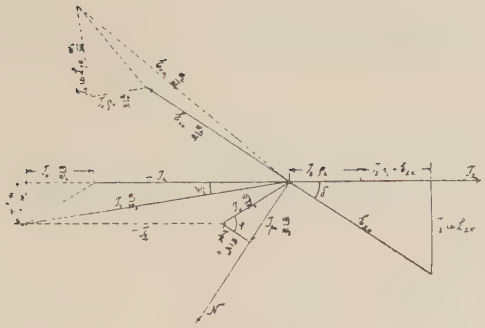


Fig. 2.

Der mittlere Teil der Figur sei hier größer gezeichnet:

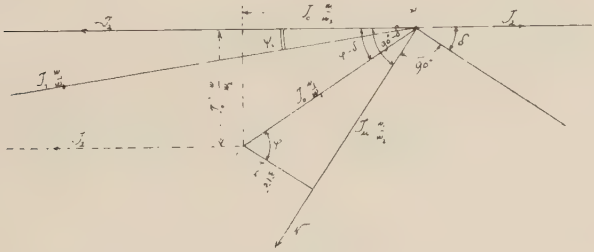


Fig. 3.

Es sei bezeichnet mit:

J_1 der Primärstrom,
J_2 der Sekundärstrom,
E_{10} die primäre E.M.K.,
E_{20} die sekundäre E.M.K.,
E_{1k} die primäre Klemmenspannung,
E_{2k} die sekundäre Klemmenspannung,
w_1 die primäre Windungszahl,
w_2 die sekundäre Windungszahl,
ϱ_1 der Ohmsche Widerstand der Primärwicklung,
ϱ_2 der Ohmsche Widerstand der Sekundärwicklung,
r_2 der Ohmsche Widerstand der angeschlossenen Instrumente,

z die sekundliche Wechselzahl,

$\omega = \pi z$ die Polargeschwindigkeit der sinusförmigen Wechselspannung,

L der Selbstinduktionskoeff. der angeschlossenen Instrumente,

$L_{1\sigma}$ der Selbstinduktionskoeff. des primären Streufeldes,

$L_{2\sigma}$ der Selbstinduktionskoeff. des sekundären Streufeldes,

J_0 der gesamte Magnetisierungsstrom,

$J\mu$ seine wattlose Komponente,

J_h seine Wattkomponente,

φ der Winkel zwischen J_0 und J_h,

ψ_i, ψ_e der Winkel zwischen J_1 und $-J_2$ bezw. E_{1k} und $-E_{2k}$,

δ der Winkel zwischen J_2 und E_{20} („Streuwinkel"),

q der effektive Eisenquerschnitt,

l die Kraftlinienlänge,

B_{max} die maximale Kraftlinienzahl pro cm² (magnetische Induktion),

H das effektive magnetische Gefälle $= \frac{4\pi}{10} \frac{J\mu\, w}{l}$,

$\mu = \frac{B_{max}}{H}$ eine besonders formulierte Wechselstrompermeabilität.

Näheres siehe Heinke, Handbuch der Elektrotechnik, Band I, Abt. 2, Seite 471 ff.

Aus Fig. 2 ist aber angenähert, bei kleinem ψ_i

$$J_1 \frac{w_1}{w_2} - J_2 = J_0' \frac{w_1}{w_2} \times \frac{1}{\cos \psi_i}.$$

Da p_i selbst in der Größenordnung der Prozente ist, so darf hier $\cos \psi_i$ unbedenklich $= 1$ gesetzt werden, die dadurch entstehende Ungenauigkeit an p_i beträgt erst bei $\psi_i = 8^0$ ($\cos 8^0 = 0.99$) 0.0001.

Ferner ist $J_0' = J_0 \cos(\varphi - \delta)$

und $J_0 = \frac{J\mu}{\sin \varphi}$ gibt

$$p_i = \frac{\frac{\cos(\varphi-\delta)}{\sin \varphi} J\mu \frac{w_1}{w_2}}{J_2}.$$

Des weiteren ist unter Beibehaltung des oben definierten μ der Effektivwert der Feldstärke

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{J\mu\, w_1}{l};$$ hieraus

$$J\mu = \frac{10}{4\pi} H \times \frac{l}{w_1},$$ da aber $H = \frac{B_{max}}{\mu}$:

$$J\mu = \frac{10}{4\,\pi} \times \frac{B_{max}}{\mu} \times \frac{l}{w_1}, \text{ damit vorläufig}$$

$$p_i = \frac{\cos(\varphi-\delta)}{\sin\varphi} \times \frac{1}{J_2} \times \frac{10}{4\,\pi} \times \frac{B_{max}}{\mu} \times \frac{l}{w_1} \times \frac{w_1}{w_2}.$$

B_{max} erhält man aus der Gleichung für E_{20} (Transformatorgleichung)

$$E_{20} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times z \times B_{max} \times q \times w_2 \times 10^{-8}, \text{ auch ist}$$

$$E_{20} = \frac{J_2\,(r_2 + \varrho_2)}{\cos\delta} \text{ (siehe Fig. 2), solange die Streuspannung proportional } J_2 \text{ zunimmt.}$$

Hieraus

$$B_{max} = \frac{J_2\,(r_2 + \varrho_2)}{\cos\delta} \times \frac{10^8\sqrt{2}}{\pi \times z \times q \times w_2} \text{ und}$$

$$p_i = \frac{\cos(\varphi-\delta)}{\sin\varphi\cos\delta} \times \frac{w_1}{w_2} \times \frac{10^9\sqrt{2}}{4\,\pi^2} \times \frac{l\,(r_2 + \varrho_2)}{q \times w_1 \times w_2 \times z} \times \frac{1}{\mu}$$

oder, da $\cos(\varphi-\delta) = \cos\varphi \,.\, \cos\delta + \sin\varphi \,.\, \sin\delta$ ist:

$$p_i = (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\,\frac{10^9\sqrt{2}}{4\,\pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{r_2 + \varrho_2}{z \,.\, w_2^2} \cdot \frac{1}{\mu}.$$

Auf genau dieselbe Weise erhält man die Gleichung für $\sin\psi_i$, das für Leistungsmessung in Betracht kommt

$$\sin\psi_i = \frac{J_0''\,\frac{w_1}{w_2}}{J_1\,\frac{w_1}{w_2}} = \frac{J_0''}{J_1}.$$

Bei brauchbaren Meßtransformatoren kann man auf etwa 1 % genau setzen $J_1 = J_2\,\frac{w_2}{w_1}$ damit wird $\sin\psi_i = \frac{J_0''\,\cdot\,\frac{w_1}{w_2}}{J_2}$

$$J_0'' = J_0 \sin(\varphi-\delta) = J\mu\,\frac{\sin(\varphi-\delta)}{\sin\varphi}.$$

Die übrige Ableitung bleibt die gleiche, sodaß man erhält:

$$\sin\psi_i = \frac{\sin(\varphi-\delta)}{\sin\varphi\cos\delta} \times \frac{w_1}{w_2} \times \frac{10^9\sqrt{2}}{4\,\pi^2} \times \frac{l\,(r_2 + \varrho_2)}{q\;w_1\;w_2\;z} \times \frac{1}{\mu}$$

oder, da $\sin(\varphi-\delta) = \sin\varphi\cos\delta - \cos\varphi\sin\delta$ ist:

$$\sin\psi_i = (1 - \operatorname{cotg}\varphi\operatorname{tg}\delta)\,\frac{10^9\sqrt{2}}{4\,\pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{r_2 + \varrho_2}{z \,.\, w_2^2} \cdot \frac{1}{\mu}$$

Bei induktiver Belastung ist J_2 nicht mehr in Phase mit der Klemmenspannung E_{2k}, sondern hinkt um den Winkel λ nach. Das Kurzschlußdreieck sieht dann folgendermaßen aus:

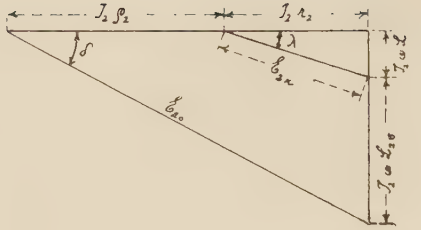


Fig. 4.

Die eine Kathete des Dreiecks hat sich um den Betrag $J_2\ \omega\ L$ vergrößert, dadurch ist δ größer geworden:

$$\operatorname{tg}\ \delta = \frac{J_2\ \omega\ L + J_2\ \omega\ L_{2\sigma}}{J_2\ (r_2 + \varrho_2)} = \frac{\omega\ L + \omega\ L_{2\sigma}}{r_2 + \varrho_2}$$

Die ganze übrige Ableitung bleibt die gleiche.

Diese beiden Gleichungen für p_i und sin ψ_i könnten, weil δ mit r_2 konstant ist, als Funktion von μ graphisch dargestellt werden. Da aber φ mit μ bei einem gegebenen Transformator und gegebener Periodenzahl in festem Zusammenhang steht und φ mit μ eine Funktion von B_{max} ist, wird man besser tun, p_i und sin ψ_i als Funktion von B_{max} darzustellen, umsomehr als B_{max} nach der Gleichung (Seite 13)

$$B_{max} = \frac{J_2\ (r_2 + \varrho_2)}{\cos\ \delta} \times \frac{10^8\ \sqrt{2}}{\pi\ z\ q\ w_2}$$

bei gegebenem r_2 (Instrumentenwiderstand) und gegebenem Streuwinkel δ proportional dem Strom J_2 ist. Dadurch werden also p_i und ψ_i als Funktion von J_2 dargestellt.

Algebraisch läßt sich der Zusammenhang von μ, φ und B_{max} nicht mehr darstellen, wohl aber graphisch. Durch den „Leerlaufversuch" ist von dem Transformator die Permeabilitätskurve μ und auch cos φ als Funktion von B_{max} gegeben. Den Winkel δ, besser gesagt den Selbstinduktionskoeffizienten $L_{2\sigma}$ des sekundären Streufeldes kennt man aus dem „Kurzschlußversuch". δ läßt sich dann berechnen aus:

$$\operatorname{tg}\ \delta = \frac{\omega\ L + \omega\ L_{2\sigma}}{r_2 + \varrho_2},\ \text{wie vorhin abgeleitet.}$$

Ist μ, cos φ, δ, sowie die Transformatorkonstanten w_1, w_2, l, q, r_2, ϱ_2, z gegeben, so läßt sich p_i und sin ψ_i bezw. ψ_i als Funktion von J_2 graphisch darstellen. Für ein gegebenes J_2 und gegebenes Instrument zur Messung von J_2 muß erst B_{max} und δ berechnet werden, letzteres

bleibt konstant, solange r_2 dasselbe ist. Zu B_{max} erhält man aus Fig. 54 μ und cos φ bezw. φ und kann damit die Gleichungen anwenden. Abgesehen von dem größeren Zahlenfaktor sind sowohl p_i als auch sin ψ_i abhängig von den Winkelgrößen φ und δ. Diese Abhängigkeit bei p_i und ψ_i ist in Figur 5 und 6 graphisch dargestellt.

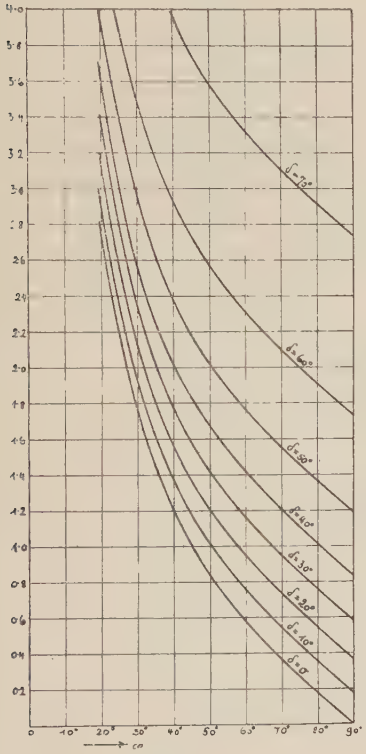


Fig. 5.

Funktion $\frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin\varphi \cos\delta}$

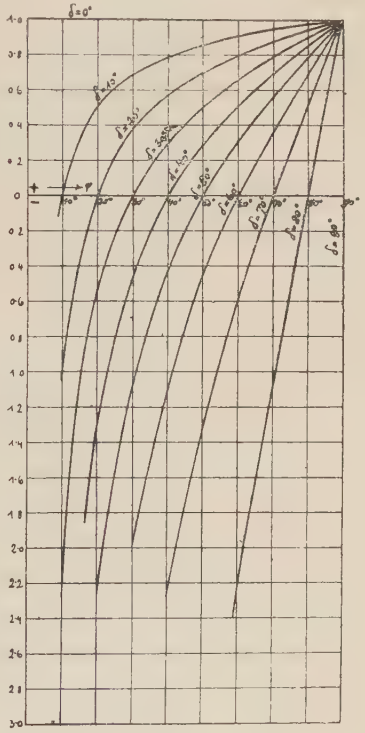


Fig. 6.

Funktion $\frac{\sin(\varphi - \delta)}{\sin\varphi \cos\delta}$

Bei gegebenem φ, d. h. bei einer bestimmten Belastung ist p_i umso größer, je größer δ ist. sin ψ_i kann dagegen zu Null werden, wenn $\delta = \varphi$ wird.

In Figur 7 und 8 sind unter Zugrundelegung der an einem Spannungswähler nach Prof. Heinke (E. T. Z. 1902, Heft 40) bei z = 100 Wechseln aufgenommenen μ = und cos φ = Kurven der charakteristische Verlauf der p_i = und sin ψ_i = Kurven graphisch dargestellt.

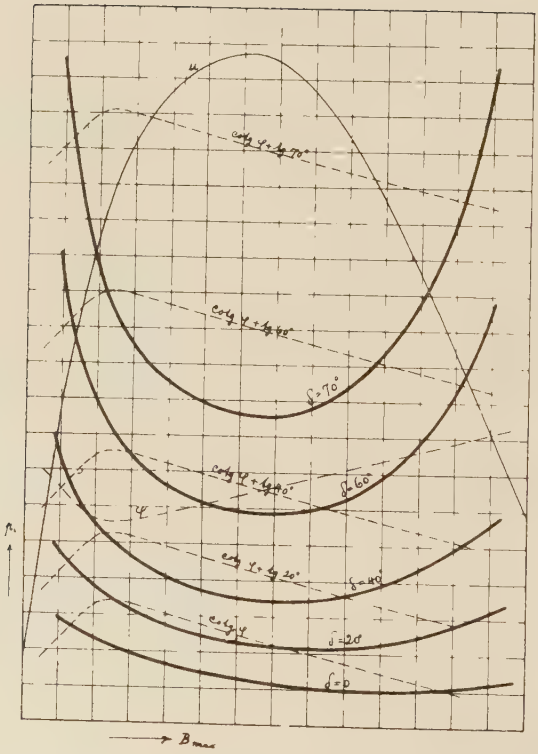

u
cotg ψ = tg 70°
cotg ψ = tg 60°
cotg ψ = tg 50°
cotg ψ = tg 20°
cotg ψ
ψ
δ = 70°
δ = 60°
δ = 40°
δ = 20°
δ = 0
p
B max

Fig. 7.

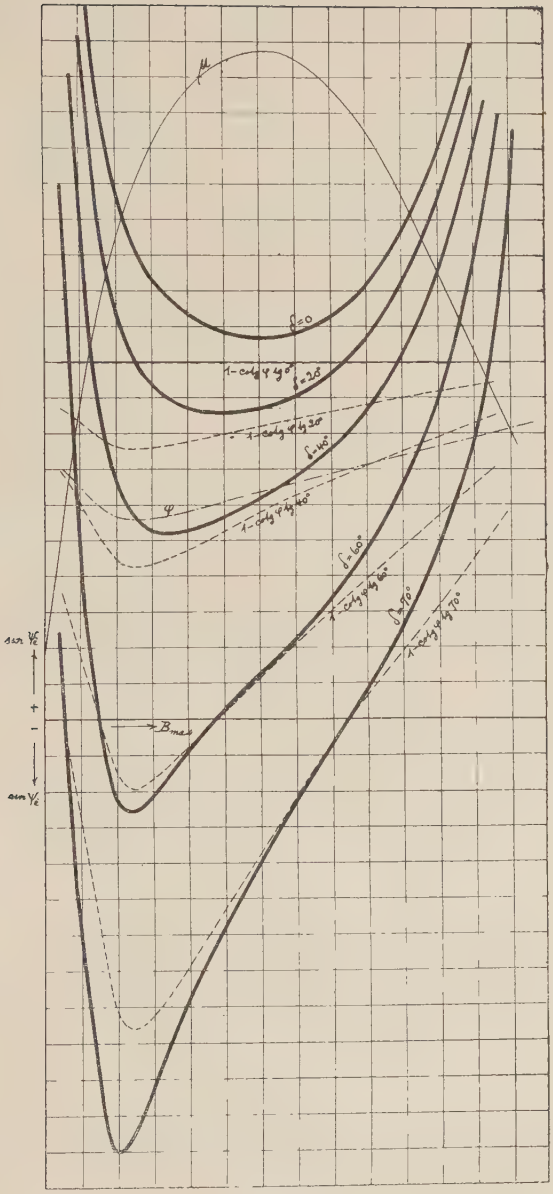

μ
δ=0
1-cotg φ tg 0°
δ=20°
1-cotg φ tg 20°
δ=40°
φ
1-cotg φ tg 40°
δ=60°
1-cotg φ tg 60°
δ=70°
1-cotg φ tg 70°
sin ψ/2
+
-
sin ψ/2
B max

Fig. 8.

Der Maßstab wurde, da nur der charakteristische Verlauf der Kurven gezeigt werden sollte, weggelassen, sodaß die Kurven nur darstellen

$$p_i = \operatorname{cotg} \varphi + \operatorname{tg} \delta \cdot \frac{1}{\mu} \quad . \text{ const. und}$$

$$\sin \psi_i = (1 - \operatorname{cotg} \varphi \operatorname{tg} \delta) \quad . \frac{1}{\mu} \quad . \text{ const.}$$

φ und μ waren gegeben, damit konnten die Kurven für p_i und sin ψ_i für verschiedene δ gerechnet werden.

Als Zwischenstufen sind die Kurven (cotg φ + tg δ) bezw. (1— cotg φ tg δ) als Funktion von B_{max} eingezeichnet. Als besonders charakteristisch ist dabei an diesen Kurven zu ersehen, daß sowohl die p_i = als auch die sin ψ_i = Kurven einen tiefsten Punkt haben. Dieser Punkt bedeutet für p_i stets auch das Minimum, bei sin ψ_i ein Minimum nur solange $\delta \leq \varphi$. Für $\delta > \varphi$ gibt es zwei Minima, entsprechend ψ_i = Null, zwischen beiden wächst sin ψ_i zu einem Maximalwert im negativen Sinn. Das Minimum von p_i fällt bei großem Streuwinkel δ angenähert mit dem Maximum von μ zusammen, bei kleinem δ tritt es erst bei höheren Induktionen ein. Anders bei ψ_i. Hier fällt der tiefste Punkt für δ = Null mit dem Maximum von μ zusammen. Für größere δ wird der tiefste Punkt schon bei kleineren Induktionen erreicht. Stets tritt bei gegebenem δ (gegebene Belastung) das Minimum von ψ_i früher ein als das von p_i.

Die Form der Kurven für p_i und sin ψ_i ist natürlich von der Form der μ = und cos φ = Kurve abhängig. Wie sich diese beiden letzteren ändern, wenn der Stromwandler künstlich vergrößerte Stoßfugen erhält, wird später an Hand von Versuchsergebnissen gezeigt werden.

2. Spannungswandler.

Die Gleichungen für die Spannungswandler seien an Hand nachfolgenden Diagrammes abgeleitet.

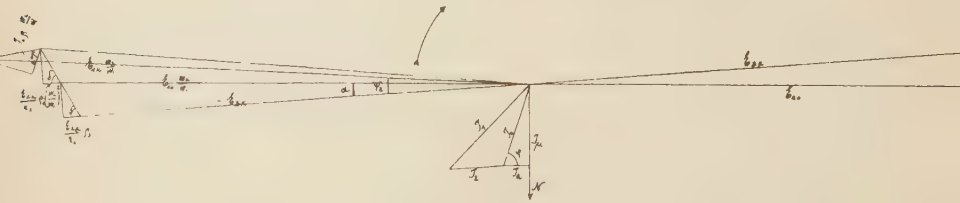


Fig. 9.

Der wesentlichste Teil sei vergrößert wiederholt:

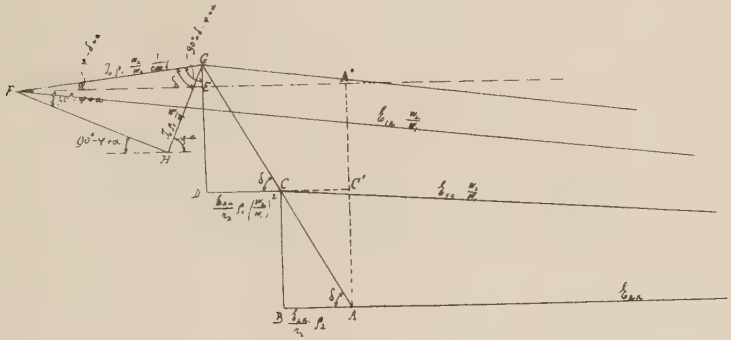


Fig. 10.

Unter Benützung der auf Seite 11 u. 12 festgesetzten Bezeichnungen ist das Korrektionsglied p_e

$$p_e = \frac{E_{1k}\,\frac{w_2}{w_1} - E_{2k}}{E_{2k}}, \text{ oder nach Fig. 10}$$

$$p_e = \frac{\overline{AB} + \overline{CD} + \overline{EF}}{E_{2k}}$$

$$\overline{AB} = J_2\,\varrho_2 = \frac{E_{2k}}{r_2}\,\varrho_2 \quad (J_2 \text{ in Phase mit } E_{2k})$$

$$\overline{CD} = J_2 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \cdot \varrho_1 = \frac{E_{2k}}{r_2}\,\varrho_1 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$$

$$\overline{\overline{EF}} = J_0\,\varrho_1\,\frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{1}{\cos\delta}\cos(\varphi - \delta + \alpha)$$

α ist aber gegenüber φ und δ immer klein, nur in der Figur ist es übertrieben gezeichnet. Daher kann man mit genügender Annäherung schreiben:

$$\overline{\overline{EF}} = J_0\,\varrho_1\,\frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\cos\delta}$$

$$J_0 = \frac{J\mu}{\sin\varphi} \text{ gesetzt, gibt}$$

$$\overline{\overline{EF}} = \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin\varphi\,\cos\delta}\,J\mu\,\varrho_1\,\frac{w_2}{w_1}$$

$$J\mu = \frac{10}{4\pi}\,H\,\frac{l}{w_1};\quad H = \frac{B_{max}}{\mu};\ \text{daraus}$$

$$J\mu = \frac{10}{4\,\pi} \cdot \frac{B_{max}}{\mu} \cdot \frac{l}{w_1};$$

B_{max} erhält man aus der Gleichung für E_{20}

$$E_{20} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \, z \, B_{max} \, q \, w_2 \, 10^{-8}$$

Nun ist aber — für die Fehlerbestimmung hinreichend genau — $E_{20} = E_{2k}$, also

$$B_{max} = E_{2k} \, \frac{10^8 \sqrt{2}}{\pi \, z \, q \, w_2}, \text{ eingesetzt gibt}$$

$$\overline{EF} = \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \, \varrho_1 \, \frac{w_2}{w_1} \, \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{l}{w_1} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_{2k} \, 10^3 \sqrt{2}}{\pi \, z \, q \, w_2}$$

$$\text{oder } \overline{EF} = \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{10^9 \sqrt{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{l \, \varrho_1 \, E_{2k}}{w_1 \, w_2 \, q \, z} \cdot \frac{1}{\mu}$$

Mithin

$$p_e = \frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2} \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 + \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \cdot \frac{10^9 \sqrt{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{l \, \varrho_1}{q \, z \, w_1^2} \cdot \frac{1}{\mu}$$

oder

$$p_e = \frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2} \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 + (\operatorname{cotg} \varphi + \operatorname{tg} \delta) \, \frac{10^9 \sqrt{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{\varrho_1}{z \, w_1^2} \cdot \frac{1}{\mu}$$

Ebenso erhält man die Gleichung für $\sin \psi_e$:

$$\sin \psi_e = \frac{-\overline{BC} - \overline{GD} + \overline{GE}}{E_{1k} \frac{w_2}{w_1}}, \text{ wenn der Winkel dann, ebenso wie bei}$$

Stromwandlern positiv angenommen wird, falls die Sekundärgröße der primären voreilt.

Wiederum $E_{1k} \frac{w_2}{w_1} = E_{2k}$ gesetzt:

$$\sin \psi_e = \frac{-\overline{BC} - \overline{GD} + \overline{GE}}{E_{2k}}$$

$$\overline{BC} = \frac{E_{2k}}{r_2} \, \varrho_2 \operatorname{tg} \delta$$

$$\overline{GD} = \frac{E_{2k}}{r_2} \, \varrho_1 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$\overline{GE} = J_0 \, \varrho_1 \, \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{1}{\cos \delta} \sin(\varphi - \delta + \alpha)$$

auch hier α gegen φ und δ vernachlässigt gibt

$$\overline{GE} = J_0 \, \varrho_1 \, \frac{w_2}{w_1} \, \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos \delta} \quad (\overline{GE} \text{ klein gegenüber } \overline{BC} + \overline{GD})$$

Durch die gleichen Substitutionen wie bei der Bestimmung von p_e erhält man

$$\overline{GE} = \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{10^9 \sqrt{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{\varrho_1 \, E_{2k}}{w_1 \, w_2 \, z} \cdot \frac{1}{\mu}$$

und weiter:

$$\sin \psi_e = -\left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] \operatorname{tg} \delta + \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \cdot \frac{10^9 \sqrt{2}}{4 \pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{\varrho_1}{w_1^2 z} \cdot \frac{1}{\mu}$$

oder:

$$\sin \psi_e = -\left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] \operatorname{tg} \delta + (1 - \operatorname{cotg} \varphi \operatorname{tg} \delta) \frac{10^9 \sqrt{2}}{4 \pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{\varrho_1}{w_1^2 z} \cdot \frac{1}{\mu}$$

Diese Formel gilt für den Fall, daß J_2 in Phase mit E_{2k} ist. Bei induktiver oder kapazitiver Belastung des Sekundärkreises bekommen die von J_2 herrührenden Spannungsabfalldreiecke eine andere Lage, wodurch sowohl p_e als auch ψ_e geändert werden. Nachstehend sind die Formeln für einen um den Winkel λ der Spannung E_{2k} nacheilenden Strom J_2 kurz abgeleitet. Das vom Magnetisierungsstrom J_0 herrührende Spannungsabfalldreieck FGH. ist nach Größe und Lage das gleiche geblieben, geändert haben sich nur die beiden andern Dreiecke und damit die Strecke $\overline{A''E}$ für p_e bezw. A'A für ψ_e.

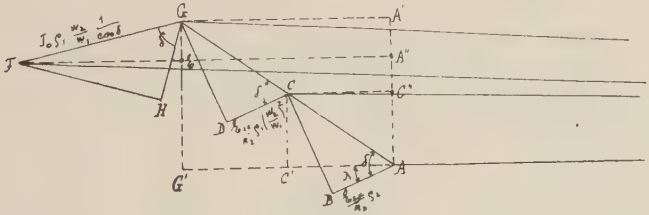


Fig. 11.

$$\overline{AC'} = AC \cos(\delta - \lambda) = \frac{AB}{\cos \delta} \cos(\delta - \lambda)$$

$$= \frac{\varrho_2}{r_2} E_{2k} \frac{\cos(\delta - \lambda)}{\cos \delta}, \text{ ebenso}$$

$$\overline{C'G'} = \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 E_{2k} \frac{\cos(\delta - \lambda)}{\cos \delta}$$

$$\overline{AG'} = \overline{A''E} = \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] E_{2k} \frac{\cos(\delta - \lambda)}{\cos \delta}$$

Die Formel für p_e lautet damit:

$$p_e = \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] \frac{\cos(\delta - \lambda)}{\cos \delta} + (\operatorname{cotg} \varphi + \operatorname{tg} \delta) \frac{10^9 \sqrt{2}}{4 \pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{\varrho_1}{w_1^2 z} \cdot \frac{1}{\mu}$$

Ferner: $\overline{AC''} = \overline{AC} \sin(\delta - \lambda)$

$$= \frac{\varrho_2}{r_2} E_{2k} \frac{\sin(\delta - \lambda)}{\cos \delta}$$

desgleichen $\overline{A'C''} = \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 E_{2k} \frac{\sin(\delta - \lambda)}{\cos \delta}$

Damit erhält man:

$$\overline{AA'} = \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] E_{2k}\,\frac{\sin(\delta-\lambda)}{\cos\delta}$$

und

$$\sin\psi_e = -\left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right]\frac{\sin(\delta-\lambda)}{\cos\delta} + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\operatorname{tg}\delta)\,\frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2}\cdot\frac{l}{q}\cdot\frac{\varrho_1}{w_1^2 z}\cdot\frac{1}{\mu}$$

Für λ = Null gehen beide Gleichungen in die zuerst abgeleiteten über.

Für kapazitive Belastung ist λ negativ einzusetzen, also

$$\frac{\cos(\delta + \lambda)}{\cos\delta} \text{ bezw. } \frac{\sin(\delta + \lambda)}{\cos\delta}.$$

Wird die Summe $\delta + \lambda$ größer als 90°, so wird cos $(\delta + \lambda)$ negativ. p_e wird aber erst dann negativ, wenn das erste Glied das zweite, das ja nie zu Null wird, überwiegt. Praktisch wird dies kaum eintreten, da der einzige Fall von kapazitiver Belastung — Verwendung statischer Voltmeter — das Negativwerden von p_e nicht zur Folge haben kann, weil J_2 sehr klein ist. Für $\lambda = \delta$ wird bei induktiver Belastung die von der Sekundärbelastung herrührende Phasenverschiebung zu Null, für $\lambda > \delta$ addiert sie sich, während sie ja bei induktionsfreier Belastung um die vom Magnetisierungsstrom herrührende Phasenverschiebung vermindert wird. —

Der charakteristische Verlauf von p und sinψ ist bei Spannungswandlern derselbe wie bei Stromwandlern, nur tritt sowohl bei p_e als auch bei sinψ_e ein mit der Belastung konstantes Glied hinzu, in der Hauptsache das Verhältnis

$$\frac{\text{sekundärer Eigenwiderstand}}{\text{sekundärer Nutzwiderstand.}}$$

Die Phasenverschiebung ψ_e ist bei Spannungswandlern, solange das 2. Glied überwiegt und $\delta < \varphi$ ist, vom selben Sinn wie bei Stromwandlern. Bei Spannungswandlern eilt dann — E_{2k} der Klemmenspannung E_{1k} voraus, wie bei Stromwandlern — J_2 dem Primärstrom J_1 voraufeilt. Solange $r_2 = \infty$ oder sehr groß ist, überwiegt das 2. Glied, mit zunehmender Belastung kann aber ψ_e negativ werden.

III. Einfluß der Transformation auf Leistungsmessungen.

1. Stromwandler.

a) Einfluß der Phasenverschiebung ψ_i.

Auf Seite 9 wurde bereits bewiesen, daß eine Phasenverschiebung von 180° zwischen J_1 und J_2 nur das Vorzeichen der Leistung umkehrt. Durch das Auftreten des Winkels ψ_i zwischen J_1 und $(-J_2)$ weichen aber die Angaben des primären und sekundären Wattmeters numerisch von einander ab, selbst dann, wenn das Korrektionsglied am Umsetzungsverhältnis p_i = Null ist.

Abgesehen vom Vorzeichen bestehen also folgende Beziehungen für $w_1 = w_2$:

$$W_1 = E_1 \, J_1 \cos \Phi$$
$$W_2 = E_1 \, J_1 \cos (\Phi \pm \psi_i)$$

Oberes Zeichen für kapazitive
Unteres Zeichen für induktive } Belastung,

wenn $(-J_2)$ dem J_1 voraufeilt. In diesem Fall ist ψ_i, auch der Formel entsprechend, als positiv bezeichnet.

Kapazitive Belastung.

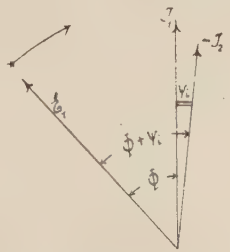
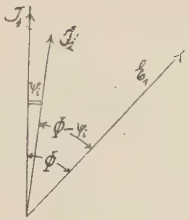


Fig. 12.



Induktive Belastung.

Fig. 13.

Für induktionsfreie Belastung ($\Phi = 0$) ist

$$W_2 = E_1 \, J_1 \cos \psi_i$$

Abgesehen von einer Konstanten kann man schreiben:

$$W_1 = \cos \Phi$$
$$W_2 = \cos (\Phi \pm \psi_i) = \cos \Phi \cos \psi_i + \sin \Phi \sin \psi_i$$
$$= \cos \Phi \, (\cos \psi_i \mp \operatorname{tg} \Phi \sin \psi_i)$$
$$W_2 = W_1 \, (\cos \psi_i \mp \operatorname{tg} \Phi \sin \psi_i)$$

Das von der Phasenverschiebung ψ_i herrührende Korrektionsglied in % zu den Angaben von W_2 ist:

$$k\,\% = 100\,\frac{W_1 - W_2}{W_2} = 100\,\frac{\cos\Phi - \cos\Phi\,(\cos\psi_i \mp \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i)}{\cos\Phi\,(\cos\psi_i \mp \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i)}$$

$$\text{oder: } k\,\% = 100\,.\,\frac{1 - \cos\psi_i \pm \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i}{\cos\psi_i \mp \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i}$$

In dieser Formel sind, abgesehen von der Voraussetzung, daß p_i = Null ist, keine Vernachlässigungen gemacht.

Vereinfachungen:

Da ψ sehr klein ist, so ist cos ψ sehr nahe = 1. Der Fehler beträgt erst bei 2·5° 1‰. Das Korrektionsglied vereinfacht sich dann zu:

$$k\,\% = 100 \cdot \frac{\pm \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i}{1 \pm \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i} = 100 \cdot \frac{\pm \sin\psi_i}{\operatorname{cotg}\Phi \pm \sin\psi_i}.$$

Ist ferner die Phasenverschiebung Φ nicht allzu groß, so ist $W_2 \sim W_1$, wir können $\frac{W_1 - W_2}{W_2} = \frac{W_1 - W_2}{W_1}$ setzen, dann vereinfacht sich die Formel noch weiter:

$$k\,\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 = \frac{\cos\Phi\,(1 - 1 \pm \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i)}{\cos\Phi}\,100$$

$$\text{oder: } k\,\% = \pm\,100 \operatorname{tg}\Phi \sin\psi_i.$$

Setzt man den sin ψ_i = dem Bogen ψ_i:

$$\sin\psi_i = \frac{\pi}{180} \times \psi_i^\circ, \text{ so ist}$$

$$k\,\% = \pm\,100 \operatorname{tg}\Phi\,\frac{\pi}{180}\,\psi_i^\circ \text{ oder, wenn}$$

ψ_i in Minuten eingesetzt wird:

$$k\,\% = \pm\,100 \operatorname{tg}\Phi\,\frac{\pi}{180}\,.\,\frac{1}{60}\,.\,\psi_i'$$

$$k\,\% = \pm\,\frac{\pi}{108} \operatorname{tg}\Phi\,\psi_i'.$$

NB! Oberes Zeichen für kapazitive, unteres Zeichen für induktive Belastung geltend.

Diese letzte Formel ist bereits in einem Prüfungsschein der Physikalisch-technischen Reichsanstalt vom 17. Oktober 1908 angegeben für einen Stromwandler der Firma Koch & Sterzel.

Um den charakteristischen Verlauf der 3 Korrekturformeln vergleichen zu können, sind sie in Fig. 14 nebeneinander graphisch dargestellt für $\psi_i = 20'$.

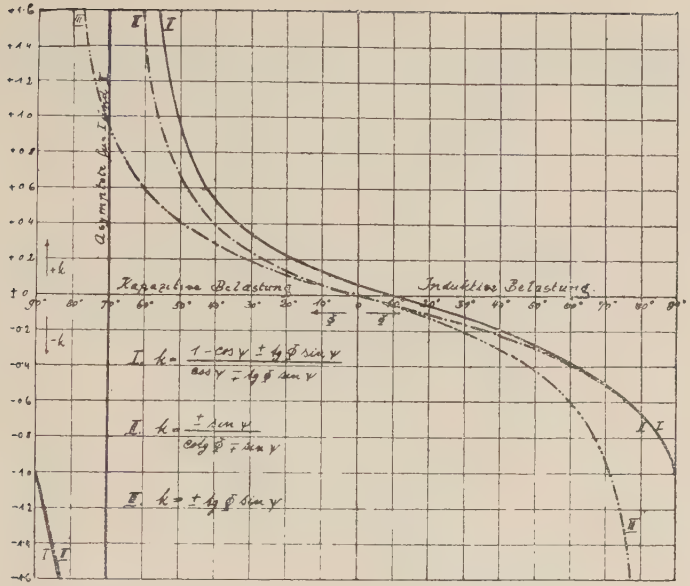


Fig. 14.

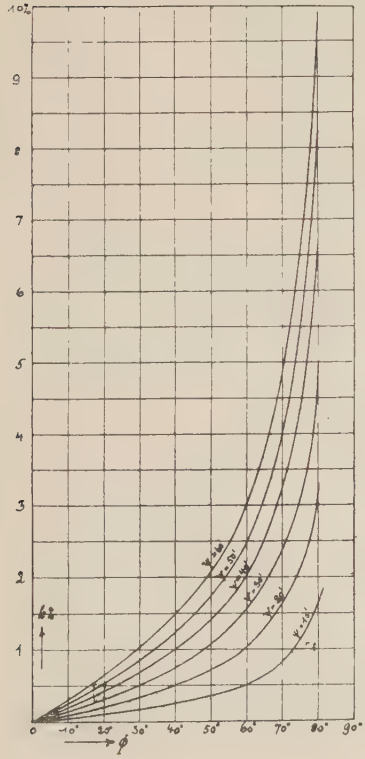


Fig. 15.

In Fig. 15 sind für $\psi_1 = 10 \div 60$ Minuten die Korrekturen als Funktion der Phasenverschiebung Φ dargestellt nach der Formel

$$k\,\% = + \frac{\pi}{108} \operatorname{tg} \Phi \; \psi_1'.$$

Untenstehend ist eine Konstruktion angegeben, mit der sich auf einfache Weise für jeden cos Φ und jedes ψ das Korrektionsglied k ermitteln läßt.

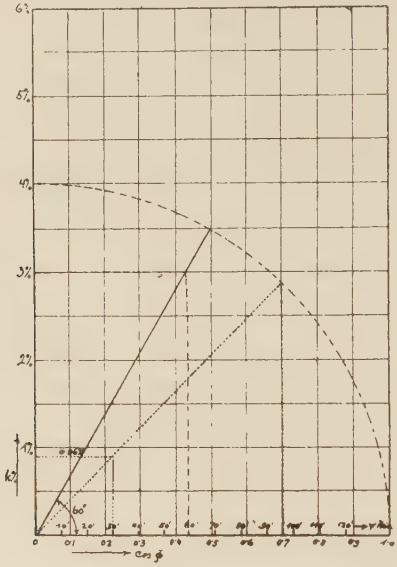


Fig. 16.

Aus cos Φ bestimmt man zuerst Φ mit Hilfe des Kreises, dann erst mit dem zugehörigen ψ das Korrektionsglied k. Die Prozentteilung wird willkürlich angenommen, nach dieser für einen Punkt das zugehörige ψ rechnerisch ermittelt, z. B. für $k = 3.0\,\%$ und $\Phi = 60^0$ berechnet sich $\psi = 60'$. Hat man einen Wert von ψ, so kann der Maßstab für ψ proportional hergestellt werden.

Die Ermittlung von k bei gegebenem ψ ist punktiert eingezeichnet. Beispiel:

Gegeben cos $\Phi = 0.7$; $\psi = 30$ Minuten.
graphisch ermittelt : $k = 0.86\%$
rechnerisch ermittelt : $k = 0.89\%$, also gute Übereinstimmung.

b) Einfluß von p_i und ψ_i gleichzeitig auf die Leistungsmessung.

Zu messen ist die Leistung $W_1 = E_1 J_1 \cos \Phi$,
gemessen wird $W_2 = E_1 J_2 \cos (\Phi \pm \psi_i)$.

Auf Seite 24 wurde das von ψ_i herrührende Korrektionsglied bestimmt zu

$$k\,\% = \pm\ 100 \operatorname{tg} \Phi \sin \psi_i \text{ oder}$$
$$k = + \operatorname{tg} \Phi \sin \psi_i.$$

Wäre also $J_2 = J_1 \frac{w_1}{w_2}$, so hätte man W_2 nur mit dem Korrektionsfaktor $(1 + k)$ zu multiplizieren. Da aber dieser ideale Fall nie eintritt, so hat man außerdem noch die Sekundärleistung mit dem Korrektionsfaktor $(1 + p_i)$ zu multiplizieren, um die Primärleistung zu erhalten. Wird also W_2 gemessen, so ist W_1

$$W_1 = W_2\ (1 + p_i)\ (1 \pm k)$$
$$= W_2\ (1 + p_i\ k + p_i \pm k),$$

$p_i\ k$ wegen seiner Kleinheit vernachläßigt:

$$W_1 = W_2\ (1 + p_i \pm k)$$

(immer noch oberes Zeichen für kapazitive, unteres für induktive Belastung).

Aus dieser Gleichung geht hervor, daß bei induktiver Belastung der totale Korrektionsfaktor = 1 werden kann, nämlich wenn $p_i = k$ ist oder

$$p_i = \operatorname{tg} \Phi \sin \psi_i$$

p_i und $\sin \psi_i$ unterscheiden sich bei Stromwandlern nach den Ableitungen nur um die Winkelfunktion, es ist also:

$$\frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} = \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \operatorname{tg} \Phi, \text{ hieraus}$$
$$\operatorname{cotg}(\varphi - \delta) = \operatorname{tg} \Phi$$
$$\varphi - \delta = 90^0 - \Phi.$$

Damit also bei induktiver Belastung der gesamte Korrektionsfaktor für Leistungsmessung = 1 wird, muß sein

bei Φ =	0°, entsprechend cos Φ =	1	$\varphi - \delta$ = 90°
	20°	0.94	= 70°
	40°	0.77	= 50°
	60°	0.50	= 30°
	80°	0.174	= 10°
	90°	0.0	= 0°

Bei einem Leistungsfaktor von cos Φ = 0.8 ist tg Φ = 0.749, Φ = 37°, $\varphi - \delta$ = 53°.

φ bewegt sich innerhalb der Grenzen 60 . 85°, dementsprechend muß δ = 7 : 32° betragen, um eine vollkommene Kompensierung von p_i durch k eintreten zu lassen bei obigem Leistungsfaktor. Es

sei an dieser Stelle erwähnt, daß bei Versuchen, die an einem später näher zu beschreibenden Stromwandler mit abnorm kleiner Windungszahl (Wechselspannungswähler mit $w_1 = w_2 = 20$) tatsächlich die Sekundärleistung um erhebliches größer gemessen wurde als die Primärleistung betrug, d. h. Überkompensierung ($-k > +p_i$) eintrat.

2. Spannungswandler.

Während bei der Stromtransformation nur für $\varphi \leqq \delta$ der Winkel ψ_i zu Null oder negativ werden kann, liegen bei der Spannungstransformation, wie schon auf Seite 22 kurz besprochen, die Verhältnisse anders. Für offenen Sekundärkreis ($r_2 = \infty$) ist sin ψ_e positiv, solange nicht etwa $\varphi < \delta$ würde. Wird der Transformator induktionsfrei belastet, so wird von diesem positiven Glied das erste negative subtrahiert, bei einem bestimmten Wert von r_2 wird bei gleichbleibendem E_{1k} der Winkel ψ_e zu Null. Nimmt r_2 noch weiter ab, so wird ψ_e negativ und hat damit entgegengesetzten Richtungssinn wie ψ_i normalerweise bei Stromwandlern. Das Korrektionsglied p_e bleibt dabei auch nicht ungeändert, sondern nimmt mit abnehmendem r_2 (= zunehmendem J_2) um einen entsprechenden Betrag zu. Die Verhältnisse werden aus folgender Figur (Fig. 17) klarer werden. Der Maßstab für p_e und sin ψ_e ist so zu wählen, daß wenn z. B. für p_e a cm $0._{01}$ bedeuten, für sin ψ_e $\frac{a}{\text{tg } \delta}$ cm $0._{01}$ bedeutet, sodaß maßstäblich stets

$$\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 = \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] \text{ tg } \delta \text{ wird.}$$

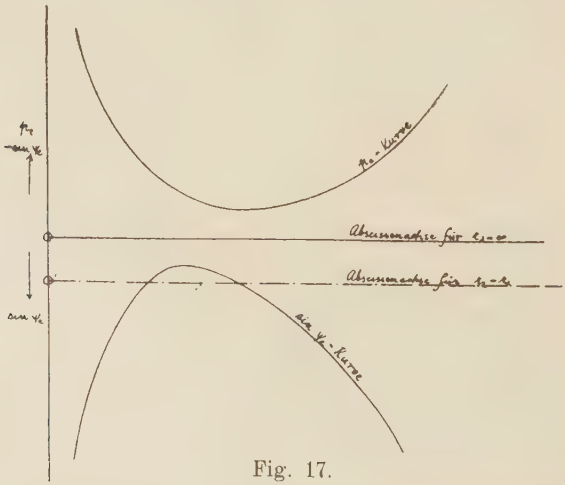


Fig. 17.

Dadurch wird erreicht, daß man für p_e und sin ψ'_e nur eine neue Abszissenachse zu zeichnen hat, während man bei anderer Wahl des Maßstabes je eine neue für p_e und sin ψ'_e festzulegen hätte.

Die gezeichneten Kurven sollen den ungefähren Verlauf von p_e und sin ψ'_e für einen Spannungswandler darstellen. Für $r_2 = \infty$ geht die Abszissenachse durch den Punkt 0, sin ψ'_e ist durchweg positiv (aber nach unten gezeichnet). Wird der sekundäre Widerstand auf den Betrag r_2 vermindert, so nimmt p_e um $\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$ zu, entsprechend der Strecke 00′. sin ψ'_e nimmt ab um $\left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right]$ tg δ, gleichfalls 00′ entsprechend. Die neue Abszissenachse geht also durch den Punkt 0. Dieser rückt umso tiefer hinab, je kleiner r_2 ist. Im gezeichneten Falle wurde bereits sin ψ'_e negativ.

Dabei ist allerdings, wenn sich die p_e = und sin ψ'_e = Kurven nicht ändern sollen, vorausgesetzt, daß die Induktion B_{max} die gleiche blieb, was ja auch hinreichend genau der Fall ist.

Die Bestimmung des Korrektionsgliedes k bleibt die gleiche, an Stelle von ψ_i ist ψ'_e zu setzen:

$$k = \pm \text{ tg } \Phi \text{ sin } \psi'_e,$$

ist ψ'_e negativ, so wird sin ψ'_e negativ, das Vorzeichen kehrt sich um. Desgleichen ist auch für p_i einfach p_e zu setzen, wodurch man erhält für die Transformation der Spannung:

$$W_1 = W_2 (1 + p_e \pm k).$$

3. Transformation von Strom- und Spannung zur Leistungsmessung.

Zur Erläuterung diene folgendes Diagramm, für den Fall gezeichnet, daß ψ_i und ψ'_e beide den gleichen Sinn haben, z. B. positiv.

Induktive Belastung.

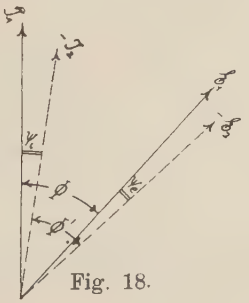


Fig. 18.

Die resultierende Phasenverschiebung ist

$$\Phi' = \Phi - \psi_i + \psi'_e = \Phi - (\psi_i - \psi'_e)$$

Haben ψ_i und ψ'_e ungleichen Sinn, so ergibt sich Φ' ohne weiteres durch Einführung des entsprechenden Vorzeichens. Welchen Sinn der resultierende Winkel $\psi_i - \psi'_e$ hat, läßt sich nicht allgemein sagen, da ja sogar ψ_i negativ werden kann.

Mißt man die sekundäre Leistung unter Transformation von Strom und Spannung, so ergibt sich die primäre Leistung:

$$W_1 = W_2 (1 + p_i) (1 + p_e) (1 \pm \operatorname{tg} \Phi \sin [\psi_i - \psi'_e])$$

Eine allgemeine Diskussion dieser Formel ist nicht durchführbar, da nicht nur ψ_i und ψ'_e, sondern auch p_i und p_e, wie im VI. Abschnitt gezeigt sein wird, positiv oder negativ sein kann. Sieht man dagegen von p_i und p_e ab, so läßt sich sagen, daß sich die Phasenverschiebungen beim schwach belasteten Spannungswandler und Stromwandler mehr oder weniger kompensieren; weil dann ψ_i und ψ'_e gleichen Richtungssinn haben. In der Regel wird aber der Einfluß der Phasenverschiebung des Stromwandlers überwiegen.

IV. Experimentelle Untersuchungen.

Für Stromtransformatoren wurden die Versuche vorgenommen an einem Heinke'schen Wechselspannungswähler (E. T. Z. 1902, Heft 40) des Instituts mit veränderlichem Umsetzungsverhältnis und einem Stromwandler älterer Konstruktion von Siemens & Halske mit dem angegebenen Umsetzungsverhältnis 5: 3 Amp., für Spannungstransformation außer an dem schon erwähnten Wechselspannungswähler an einem älteren Meßtransformator der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft „Helios".

1. Ermittlung der Größen p_i und ψ_i für Stromwandler.

Eine Schaltung zur Untersuchung von Stromtransformatoren wurde bereits im Handbuch der Elektrotechnik, Band II, Abt. 4, Seite 21 von Prof. Heinke angegeben. Aus den Wattmeterangaben $E_1\ J_1 \cos \varphi_1$ und $E_1\ J_2 \cos \varphi_2 = E_1\ J_2 \cos (\varphi_1 \pm \psi_i)$ wird dort ψ_i berechnet, also aus der Differenz zweier wohl kaum genauer als auf $0.5\ \%$ zu erhaltender Leistungsfaktoren. Ist letzterer groß, so ist die Bestimmung von ψ_i ($< 1^0$) sehr unsicher. Aus diesem Grund wurde folgende, abgeänderte Schaltung verwendet:

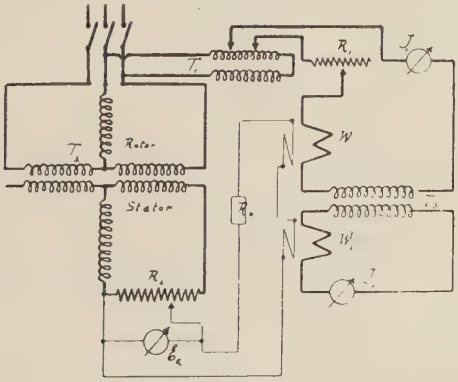


Fig. 19.

Der Strom J_1 wird aus einer Phase eines Drehstromgenerators entnommen. Der als Halbtransformator geschaltete Spannungswähler

T_1 und der Regulierwiderstand R_1 dienen zur Variierung von J_1 innerhalb weiter Grenzen. J_1 wird der Primärseite des Stromwandlers T_3 zugeführt und dessen Sekundärseite über die Stromspule des Wattmeters W_2 und das Hitzdrahtampèremeter J_2 kurzgeschlossen.

Die Spannungsspulen der beiden Wattmeter werden mit einem Vorschaltwiderstand R_v zusammen in Serie an eine Hilfsspannung E_h gelegt, die gegen den Strom J_1 beliebig räumlich verdrehbar ist. Zu diesem Zweck ist der Phasentransformator T_2 eingeschaltet. E_h ist mittels des Spannungsteilers R_2 zur Erhöhung der Meßgenauigkeit so zu wählen, daß die Spannungsspulen der beiden Wattmeter die maximal zulässige Spannung erhalten.

$p_i = \dfrac{J_1 \frac{W_1}{W_2} - J_2}{J_2}$ wird ohne weiteres aus den Ablesungen der beiden Ampèremeter J_1 und J_2 erhalten. Um sin ψ_i zu bestimmen, verdreht man den Rotor des Phasentransformators so, daß das eine Wattmeter, z. B. W_1 auf Null steht, d. h. E_h gegen J_1 um genau 90° phasenverschoben ist. Aus der Angabe des gleichzeitig abgelesenen zweiten Wattmeters erhält man dann ohne weiteres $\sin \psi_i = \dfrac{W_2}{E_h J_2}$ bezw. $\sin \psi_i = \dfrac{W_1}{E_h J_1}$ wenn W_2 auf Null eingestellt wurde.

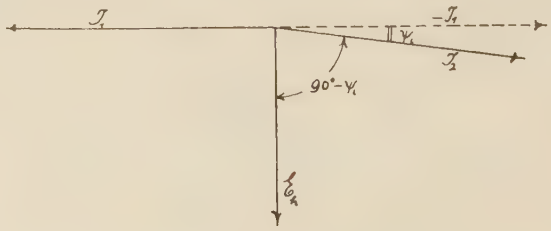


Fig. 20.

Beweis: $W_1 = E_h J_1 \cos 90^0 = 0$

$W_2 = E_h J_2 \cos (90^0 \pm \psi_i)$

$W_2 = \mp E_h J_2 \sin \psi_i$

$\sin \psi_i = \dfrac{W_2}{E_h J_2}$

Es ist leicht einzusehen, daß es gleichgültig ist, welches der beiden Wattmeter durch Verdrehen des Rotors auf Null gestellt wird. Zweckmäßig wird man aber das schwächer belastete Wattmeter auf Null einstellen.

Auf diese Weise ist man von der etwa am Phasentransformator vorhandenen Gradteilung ganz unabhängig gemacht. Ein „toter Gang" der Stellschraube und andere mechanische Ungenauigkeiten sind ohne den geringsten Einfluß auf die Messung. Für eine Reihe von Beobachtungen braucht auch der Rotor nicht in die alte Lage zurückgedreht werden, was namentlich bei der Messung größerer Phasenverschiebungen angenehm ist. Die Genauigkeit ist zur Ermittlung von Phasenverschiebungen bis herab zu 30 Minuten groß genug. Hat der Meßtransformator kleinere Phasenverschiebung als etwa 10 Minuten, so wird es — ähnlich wie man bei Isolationsmessungen den Wert als oberhalb einer gewissen Zahl angibt — genügen, wenn man weiß, daß die Phasenverschiebung unterhalb eines gewissen Betrages bleibt.

Ist z. B. ein direkt zeigendes Wattmeter von Siemens & Halske zu maximal 30 Volt und 5 Ampère voll belastet, so beträgt die Leistung bei $\cos \Phi = 1$ 150 Watt, 1 Teilstrich ($1\,^{m}/_{m}$) also $\frac{150}{150} = 1$ Watt.

Wird dieses Wattmeter wie vorstehend angegeben verwendet, und beträgt der Ausschlag 1 Teilstrich, so ist sin ψ bei voller Ausnützung von Strom- und Spannungsspule:

$$\sin \psi = \frac{1}{30 \times 5} = \frac{1}{150} = 0.0067 \quad \psi = 23 \text{ Minuten.}$$

Da Zehntel-Teilstriche noch gut geschätzt werden können und der mittlere Ablesefehler dabei zu $\frac{1}{20}$ Teilstrich angenommen werden kann, so ist demnach die Ablesung im günstigsten Fall (volle Ausnützung von Strom- und Spannungsspule vorausgesetzt) auf etwa 1 Minute genau. Für Laboratoriumszwecke dürfte es wohl auch möglich sein, Wattmeter zu bauen, bei denen die Richtkraft des beweglichen Systems derart verkleinert ist, daß die Instrumente bereits bei $\cos \Phi = 0.5$ oder gar 0.1 den vollen Ausschlag zeigen. Im letzteren Fall läßt sich unter denselben Verhältnissen der mittlere Ablesefehler auf 0.1 Minuten herabdrücken.

Zunächst folgen hier die Versuche, mit denen p_i und ψ_i ermittelt werden, und zwar wurden die ersten drei mit konstantem Sekundärwiderstand $r_2 = 2.17\ \Omega$ durchgeführt, bestehend aus dem Widerstand des Wattmeters von 0.8 Ω auf dem Meßbereich 2.5 Amp. und dem des kleinen Meßbereiches des Ampèremeters (0 . 0.65 Amp.) von 1.37 Ω. Beim Übergang auf einen größeren Meßbereich mit kleinerem Widerstand wurde r_2 durch Einfügen von Nickelinwiderstand in den Sekundärkreis auf konstanter Höhe gehalten.

a) Spannungswähler $w_1 = w_2 = 20$ Windp.

$\varrho_1 = 0.024\ \Omega$ | $z = 100$ Wechsel

$\varrho_2 = 0.014\ \Omega$ | $L = 1.23$ Millihenry.

$r_2 = 2.17\ \Omega$

J_1	J_2	E_h	α_{w1}	C_{w1}	W_1	sin ψ_i	ψ_i	$J_1 - J_2$	p_i
1.02	0.143	99.5	53.0	1.5	80.3	0.780	51°	0.877	6.13
1.275	0.247	100.0	63.0	,,	94.5	0.740	48	1.028	4.15
1.46	0.324	99.5	65.0	,,	97.5	0.672	42	1.133	3.46
1.61	0.385	100.5	68.5	,,	101.2	0.641	40	1.225	3.18
1.79	0.461	100.5	63.0	,,	94.5	0.608	37.5	1.33	2.88
2.02	0.551	100.5	77.4	,,	116.0	0.571	35.0	1.47	2.67
2.28	0.65	99.5	78.8	,,	118.1	0.522	31.5	1.63	2.50
2.60	0.80	99.5	83.2	,,	124.6	0.482	28.8	1.80	2.25
3.28	1.15	99.5	95.5	,,	143.1	0.440	26.0	2.13	1.85
3.34	1.19	101.5	49.4	3.0	148.4	0.436	25.8	2.15	1.81
3.95	1.57	100.5	53.8	,,	161.8	0.407	24.0	2.38	1.52
4.35	1.81	100.5	57.3	,,	172.0	0.392	23.0	2.54	1.40
4.48	1.87	99.5	58.5	,,	175.4	0.395	23.3	2.61	1.39
5.04	2.17	99.0	63.7	,,	191.0	0.382	22.5	2.87	1.32
5.71	2.52	98.5	71.7	,,	215.0	0.379	22.2	3.19	1.27
6.69	3.07	99.0	84.0	,,	252.0	0.380	22.3	3.62	1.18
7.19	3.28	99.0	94.0	,,	282.0	0.395	23.3	3.91	1.19

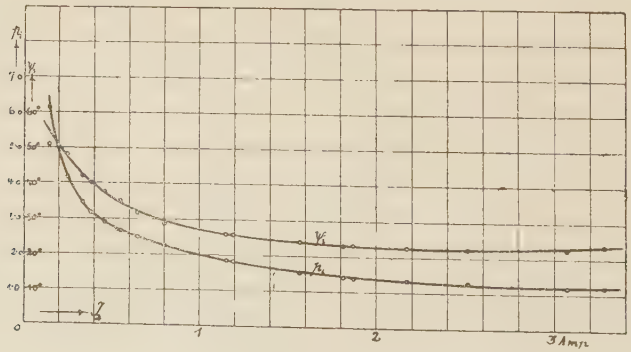


Fig. 21.

b) Spannungswähler $w_1 = w_2 = 200$
$\varrho_1 = \varrho_2 = 0.40\ \Omega$
$r_2 = 2.17\ \Omega$, z = 100 Wechsel, L = 1.23 Millihenry.

J_1	J_2	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	sin ψ_i	ψ_i	$J_1 - J_2$	p_i
0.207	0.186	105	1.3	2.0	2.6	0.133	7.6°	0.021	0.113
0.332	0.303	125	2.2	,,	4.4	0.116	6.6	0.029	0.096
0.422	0.388	119	2.4	,,	4.8	0.104	6.0	0.034	0.088
0.508	0.469	111	2.7	,,	5.4	0.104	6.0	0.039	0.083
0.644	0.600	103	3.0	,,	6.0	0.097	5.6	0.044	0.073
0.90	0.84	118	4.1	,,	8.2	0.083	4.7	0.06	0.071
1.01	0.95	126	4.8	,,	9.6	0.080	4.5	0.06	0.063
1.18	1.12	125	4.8	,,	9.6	0.069	3.9	0.06	0.054
1.34	1.27	124	5.4	,,	10.8	0.069	3.9	0.07	0.055
1.45	1.38	125	5.5	,,	11.0	0.064	3.6	0.07	0.051
1.66	1.58	124	5.9	,,	11.8	0.060	3.5	0.08	0.050
1.80	1.72	124	6.15	,,	12.3	0.058	3.4	0.08	0.047
1.96	1.87	123	6.3	,,	12.6	0.055	3.2	0.09	0.048
2.14	2.05	123	6.1	,,	12.2	0.048	2.8	0.09	0.044
2.35	2.25	122	6.6	,,	13.2	0.048	2.8	0.10	0.044
2.59	2.49	121	6.9	,,	13.8	0.046	2.6	0.10	0.040
2.88	2.77	119	7.0	,,	14.0	0.042	2.4	0.11	0.040
3.21	3.10	117	7.0	,,	14.0	0.039	2.3	0.11	0.036

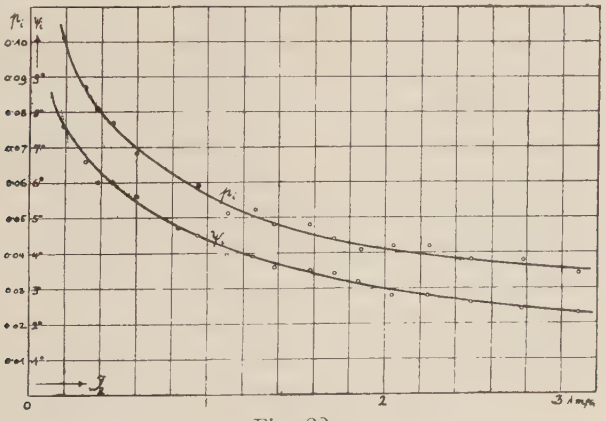


Fig. 22.

c) Stromwandler von Siemens & Halske.

$w_1 = 200$
$w_2 = 318$
$\varrho_1 = 0.299\ \Omega$
$\varrho_2 = 0.56\ \Omega$
$r_2 = 2.17\ \Omega$ L = 1.23 Millihenry
z = 100 Wechsel.

J_1	J_2	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	sin ψ_i	ψ_i	$J_1\frac{w_1}{w_2} - J_2$	p_i
0.202	0.098	97.0	0.9	2.0	1.8	0.19	12.0°	0.029	0.296
0.282	0.146	84.5	1.0	,,	2.0	0.162	9.3	0.031	0.212
0.369	0.195	95.5	1.4	,,	2.8	0.151	8.6	0.037	0.190
0.525	0.284	89.0	1.8	,,	3.6	0.142	8.2	0.046	0.162
0.655	0.356	87.5	2.1	,,	4.2	0.135	7.7	0.055	0.154
0.765	0.417	88	2.4	,,	4.8	0.131	7.5	0.063	0.151
0.875	0.480	88	2.8	,,	5.6	0.133	7.6	0.071	0.148
1.00	0.551	90	3.2	,,	6.4	0.129	7.4	0.078	0.142
1.09	0.600	91.5	3.7	,,	7.4	0.135	7.7	0.067	0.128
1.34	0.745	123	6.0	,,	12.0	0.131	7.5	0.097	0.130
1.48	0.82	120	6.5	,,	13.0	0.132	7.5	0.11	0.138
1.75	0.97	119	7.3	,,	14.6	0.124	7.3	0.14	0.145
2.16	1.20	110	8.2	,,	16.4	0.124	7.1	0.16	0.133
2.38	1.32	108	9.0	,,	18.0	0.126	7.2	0.18	0.136
2.65	1.47	104	9.6	,,	19.2	0.125	7.2	0.20	0.136
2.86	1.61	100	9.9	,,	19.8	0.123	7.1	0.19	0.118
3.31	1.86	95	10.6	,,	21.2	0.120	6.9	0.22	0.118
3.96	2.20	120	15.4	,,	30.8	0.117	6.7	0.29	0.132
4.68	2.62	113	17.0	,,	34.0	0.115	6.6	0.32	0.130
5.02	2.81	115	18.6	,,	37.2	0.115	6.6	0.35	0.125
5.37	3.02	118	20.2	,,	40.4	0.113	6.5	0.36	0.110

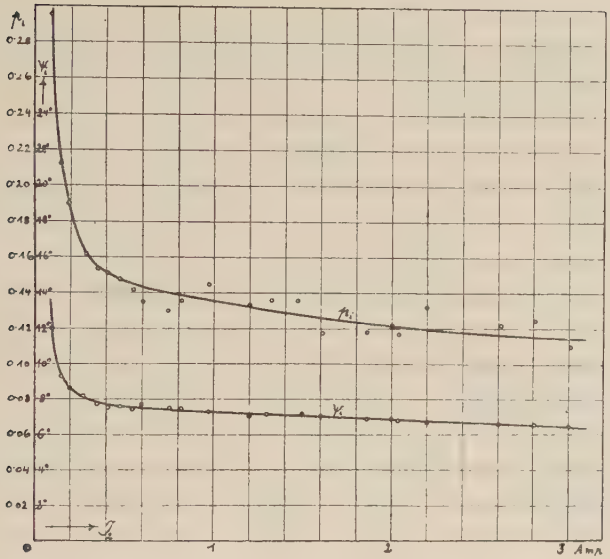


Fig. 23.

Der zu den ersten zwei Versuchsreihen als Stromwandler benützte Spannungswähler hatte bei einer mittleren Kraftlinienlänge $l = 48$ cm einen Nettoeisenquerschnitt $q = 22.8$ cm²; der zur Versuchsreihe c benützte Stromwandler von Siemens & Halske hatte folgende Form und Dimensionen:

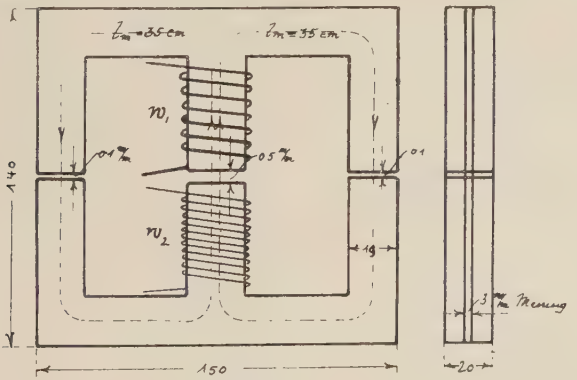


Fig. 24.

Eisenquerschnitt $q_e = 5.8$ cm² netto
Luftquerschnitt $q_l = 7.6$ cm²
Kraftlinienlänge $l = 35$ cm für jede Hälfte.

p_i und ψ_i haben den theoretisch vorausbestimmten charakteristischen Verlauf (vergl. Fig. 7, 8). Das Minimum wurde bei dem gegebenen Belastungsfall nicht erreicht. Die ungünstigsten Resultate ergibt der Stromwandler mit nur 20 Windungen. Bei $J_2 = 2.5$ Amp. beträgt p_i noch 1.3 und ψ_i 23 Grad. Wesentlich bessere Resultate gibt der Stromwandler von S. & H. Für ihn ist p_i, bezogen auf das Windungszahlenverhältnis bei $J_2 = 2.5$ Amp. $p_i = 0.118$. Da aber als Umsetzungsverhältnis $5 : 3 = 1.67$ statt dem dieser Rechnung zugrunde gelegten Windungszahlenverhältnis $318 : 200 = 1.59$ angegeben ist, so wäre p_i um $\frac{1.67 - 1.59}{1.59} = \frac{8}{1.59} = 0.05$ zu vermindern. Für diese Untersuchung ist es aber besser mit p_i bezogen auf das Windungszahlenverhältnis zu rechnen. ψ_i beträgt 6.6°. Am besten sind die Ergebnisse der 2. Versuchsreihe mit $w_1 = w_2 = 200$ an dem Wechselspannungswähler. Hier ist bei derselben Belastung und demselben Sekundärstrom

$$p_i = 0.038$$
$$\psi_i = 2.6^0$$

Daß auch dieses Resultat sehr ungünstig ist, rührt davon her, daß r_2 ziemlich groß ist. Nachstehend sind noch zwei Versuche an dem Stromwandler von Siemens & Halske niedergegeben mit $r_2 = 0.98\ \Omega$ und $r_2 = 0.38\ \Omega$, die wesentlich bessere Resultate erkennen lassen.

d) Stromwandler von Siemens & Halske $r_2 = 0.98\ \Omega$, $L = 1.23$ MH.

$J_1 \frac{w_1}{w_2}$	J_2	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	$\sin \psi_i$	ψ_i	$J_1 \frac{w_1}{w_2} - J_2$	p_i
0.755	0.66	124	3.0	2.0	6.0	0.0730	4.2	0.095	0.144
0.885	0.76	121	3.1	,,	6.2	0.0670	3.8	0.125	0.165
1.04	0.91	112	3.3	,,	6.6	0.0650	3.7	0.13	0.143
1.18	1.04	133	4.3	,,	8.6	0.0635	3.7	0.14	0.134
1.375	1.22	121	4.7	,,	9.4	0.0636	3.7	0.155	0.127
1.64	1.48	116	5.2	,,	10.4	0.0607	3.5	0.16	0.108
1.94	1.75	123	6.7	,,	13.4	0.0623	3.6	0.19	0.108
2.25	2.04	121	7.6	,,	15.2	0.0616	3.5	0.21	0.103
2.45	2.21	120	8.0	,,	16.0	0.0604	3.5	0.24	0.108
2.68	2.42	113	8.75	,,	17.5	0.0640	3.7	0.26	0.107
2.92	2.64	125	10.6	,,	21.2	0.0710	4.0	0.28	0.106
3.11	2.85	118	10.8	,,	21.6	0.0670	3.8	0.26	0.091
3.38	3.10	126	12.3	,,	24.6	0.0630	3.6	0.28	0.090
3.66	3.36	114	12.0	,,	24.0	0.0626	3.5	0.30	0.089

e) desgl. $r_2 = 0.38\ \Omega$, L = 0.31 MH.

$J_1 \frac{w_1}{w_2}$	J_2	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	sin ψ_i	ψ_i	$J_1 \frac{w_1}{w_2} - J_2$	p_i
0.80	0.71	132	1.0	4	4.0	0.0427	2.4	0.09	0.129
0.97	0.87	128	1.0	,,	4.0	0.0360	2.1	0.10	0.115
1.25	1.13	126	1.2	,,	4.8	0.0336	1.9	0.12	0.106
1.59	1.47	126	1.7	,,	6.8	0.0366	2.1	0.12	0.082
1.67	1.54	127	1.8	,,	7.2	0.0368	2.1	0.13	0.084
1.82	1.67	126	2.0	,,	8.0	0.0380	2.2	0.15	0.090
1.93	1.79	126	2.0	,,	8.0	0.0354	2.0	0.14	0.078
2.13	1.98	124	2.1	,,	8.4	0.0342	2.0	0.15	0.076
2.33	2.15	123	2.3	,,	9.2	0.0347	2.0	0.18	0.084
2.56	2.38	122	2.6	,,	10.4	0.0358	2.0	0.18	0.076
2.84	2.63	119	2.8	,,	11.2	0.0357	2.0	0.18	0.080
3.08	2.86	135	3.6	,,	14.4	0.0372	2.1	0.22	0.077
3.38	3.17	138	4.0	,,	16.0	0.0366	2.1	0.21	0.066
3.74	3.48	135	4.25	,,	17.0	0.0360	2.0	0.26	0.075

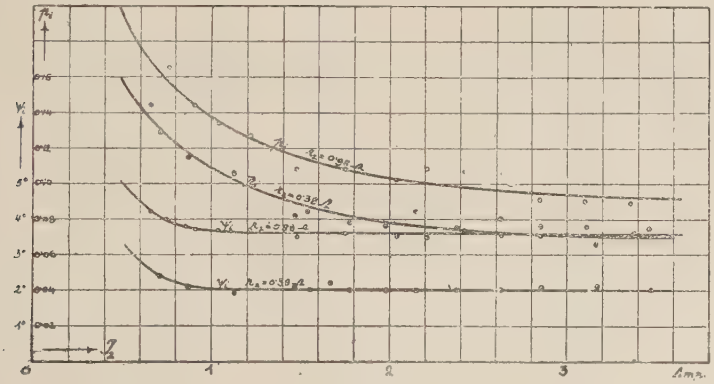


Fig. 25.

Hier ist für $r_2 = 0.98\ \Omega$ und $J_2 = 2.5$ Amp. $p_i = 0.097$
$\psi_i = 3.6^0$
$r_2 = 0.38\ \Omega$ und $J_2 = 2.5$ Amp. $p_i = 0.073$
$\psi_i = 2.0^0$.

Zum Schlusse seien hier noch zwei Versuche wiedergegeben, die für $w_1 = w_2 = 20$ an dem Wechselspannungswähler und an dem Stromwandler von Siemens & Halske die $p_i =$ und $\psi_i =$ Kurven in ihrem ganzen Verlauf zeigen.

f) Spannungswähler. $w_1 = w_2 = 20$ Windungen
$r_2 = 3.85\ \Omega$
L = 0.31 Millihenry.
z = 100 Wechsel.

J_1	J_2	E_h	α_{w1}	C_{w1}	W_1	$\sin \psi_i$	ψ_i	$J_1—J_2$	p_i
0.427	—	105	13.0	3.0	39	0.870	60°	—	—
0.735	—	104	21.6	,,	64.9	0.848	58	—	—
0.96	0.07	,,	27.0	,,	81.1	0.812	54	—	—
1.10	0.10	,,	29.9	,,	90.0	0.784	51.6	1.00	10.0
1.40	0.182	,,	34.9	,,	105.0	0.719	46	1.219	6.7
1.77	0.307	,,	40.8	,,	123	0.665	41.6	1.463	4.8
2.18	0.453	,,	45.8	,,	138	0.605	37.3	1.727	3.8
2.47	0.565	,,	49.0	,,	147	0.572	35.0	1.905	3.36
2.46	0.50	,,	48.8	,,	147	0.570	35.0	1.96	3.8
3.01	0.75	,,	55.2	,,	165	0.528	32.0	2.26	3.01
3.47	0.95	,,	62.0	,,	186	0.515	31.0	2.52	2.65
4.15	1.26	104.5	72.2	,,	214	0.498	29.9	2.89	2.29
4.66	1.50	106	81.8	,,	246	0.495	29.9	3.16	2.1
5.24	1.73	106	93.0	,,	279	0.502	30.1	3.51	2.0
5.95	1.97	105	108.8	,,	327	0.523	31.5	3.98	2.02
7.01	2.29	105	135.2	,,	406	0.552	33.5	4.72	2.06

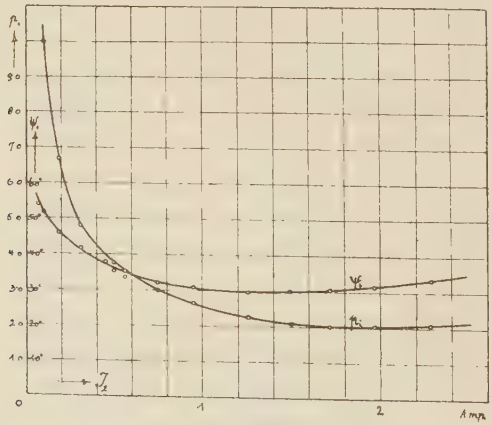


Fig. 26.

g) Stromwandler von Siemens & Halske

$r_2 = 8.87\ \Omega$

L = 1.23 Millihenry

z = 100 Wechsel.

$J_1 \frac{w_1}{w_2}$	J_2	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	sin ψ_i	ψ_i	$J_1 \frac{w_1}{w_2} - J_2$	p_i
2.86	2.20	112	52.5	2.0	105.0	0.426	25.4°	0.66	0.300
2.74	2.13	127	57.4	,,	114.8	0.424	25.0	0.64	0.300
2.65	2.06	120	51.2	,,	102.4	0.414	24.4	0.59	0.286
2.47	1.94	121	47.9	,,	95.8	0.408	24.1	0.53	0.273
2.25	1.78	121	42.6	,,	85.2	0.396	23.4	0.48	0.270
2.06	1.65	119	38.8	,,	77.6	0.395	23.3	0.41	0.248
1.78	1.41	126	34.8	,,	69.6	0.392	23.1	0.37	0.262
1.55	1.22	119	28.4	,,	56.8	0.391	23.1	0.33	0.270
1.35	1.07	121	25.3	,,	50.6	0.391	23.1	0.28	0.262
1.13	0.87	122	21.4	,,	42.8	0.404	23.7	0.26	0.299
0.914	0.72	125	18.2	,,	36.4	0.404	23.7	0.194	0.270
0.764	0.585	130	15.6	,,	31.2	0.412	24.4	0.179	0.306
0.700	0.535	109	12.0	,,	24.0	0.412	24.4	0.165	0.309
0.629	0.487	112	11.6	,,	23.2	0.425	25.2	0.142	0.292
0.557	0.428	116	10.6	,,	21.2	0.428	25.4	0.129	0.302
0.479	0.360	121	9.6	,,	19.2	0.441	26.2	0.119	0.331
0.393	0.293	127	8.4	,,	16.8	0.452	26.9	0.100	0.342
0.324	0.237	129	6.9	,,	13.8	0.452	26.9	0.087	0.366
0.266	0.191	130	5.8	,,	11.6	0.468	28.0	0.075	0.392
0.181	0.118	117	3.8	,,	7.6	0.550	33.4	0.063	0.534
0.126	0.074	117	2.4	,,	4.8	0.554	33.7	0.052	0.714
0.145	0.088	117	2.85	,,	5.7	0.554	33.7	0.057	0.650
0.107	0.061	116.5	2.0	,,	4.0	0.564	34.4	0.046	0.750

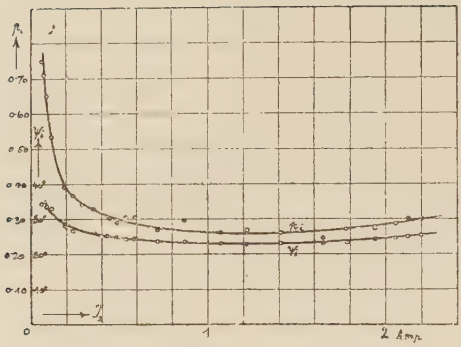


Fig. 27.

Sowohl die p_i- als auch die ψ_i-Kurve verlaufen bei diesem Stromwandler sehr flach. Dies rührt davon her, daß durch das Einfügen der Luftstrecken cos φ und μ stark herabgedrückt wurden und über einen weiten Bereich von B_{max} nur mehr innerhalb enger Grenzen sich ändern.

2. Ermittlung der Größen p und ψ für Spannungswandler.

Der Fehler am Umsetzungsverhältnis p_e und die Phasenverschiebung ψ_e werden hier auf ganz ähnliche Weise ermittelt wie bei Stromwandlern. Anstelle der Hilfsspannung E_h tritt der Hilfsstrom J_h der gegen die Spannungen verdreht wird oder gegen den die Spannungen verdreht werden.

p und ψ waren bei den untersuchten Spannungswandlern viel kleiner als bei den vorher untersuchten Stromwandlern. Für die Messung von ψ_e machte das keinen besondere Schwierigkeiten, dagegen konnte p_e nicht immer zuverläßig gemessen werden. Für offenen Sekundärstromkreis (oder angenähert bei sehr großem r_2) ist ja bei Spannungswandlern ebenso wie bei Stromwandlern

$$\frac{p_e}{\sin \psi_e} = \frac{\dfrac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta}}{\dfrac{\sin(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta}} = \operatorname{cotg}(\varphi - \delta)$$

$$p_e = \sin \psi_e \operatorname{cotg}(\varphi - \delta);$$

cotg $(\varphi - \delta)$ ist — ganz roh — in der Größenordnung 1.0 anzunehmen, dann ist also

$$p_e \doteq \sin \psi_e$$

Beträgt ψ_e 20 Minuten, ein Wert, der noch unterschritten wurde, so ist sin $\psi_e = 0.0058$ und

$p_e \doteq 0.006$ oder 0.6%, also sehr klein.

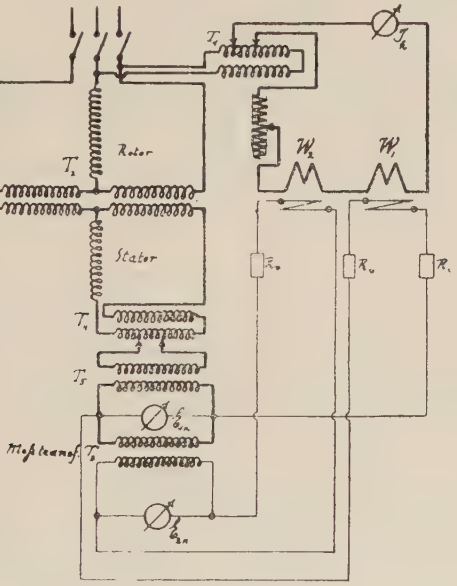


Fig. 28.

Das Schaltungsschema ist gezeichnet für die Untersuchung des schon genannten Meßtransformators der Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft „Helios". In der gezeichneten Schaltung ist E_{1k} die Hochspannung, E_{2k} die Niederspannung. Die dem Stator des Phasentransformators entnommene Spannung wurde mit Hilfe zweier Transformatoren auf bis zu 1200 Volt gebracht und diese Spannung als Primärspannung der Hochspannungsseite des Transformators zugeführt und gleichzeitig auf der Niederspannungsseite E_{2k} mit einem Hitzdrahtvoltmesser gemessen.

Der Hilfsstrom J_h wurde auf etwa 5.0 Amp. konstant gehalten, sodaß der große Meßbereich der beiden Wattmeter voll ausgenutzt

war. Die Messung der Hochspannung erfolgte mit einem elektrodynamischen Präzisionsvoltmeter von Siemens & Halske mit 2 Meßbereichen, 0 ÷ 300 und 0 ÷ 750 Volt. Die Ohmschen Widerstände dieser Meßbereiche betrugen 10 000 bezw. 25 000 Ω, entsprechend einem Stromverbrauch von 0.03 Amp. bei vollem Ausschlag. Zur weiteren Erhöhung des Meßbereiches wurden Wattmetervorschaltwiderstände benützt. Die durch Anbringung einer an 1000 Ω des Voltmetervorschaltwiderstandes abzweigenden dritten Klemme vorgesehene Serienschaltung des Voltmeters mit der Spannungsspule des einen Wattmeters wurde nicht gebraucht, weil der Selbstinduktionskoeffizient des Voltmeters so groß war (laut Angaben der Firma 0.588 ÷ 0.801 Henry je nach der Zeigerstellung), daß die dadurch entstehende Phasenverschiebung zwischen der Spannung und dem Spannungsspulenstrom im Wattmeter oft ein Vielfaches des zu messenden Winkels ψ_e war.

Während nämlich bei den ausgeführten Messungen an Stromtransformatoren sin ψ ohne weiteres aus dem Ausschlag des Wattmeters berechnet werden konnte, ist hier eine Korrektur nötig. Bei der Stromspule des Wattmeters ist nämlich, auch beim Übergang auf einen andern Meßbereich das Verhältnis $\frac{R}{\omega L}$ (R = Widerstand der Stromspule, L Selbstinduktionskoeffizient derselben), und damit die Phasenverschiebung zwischen der Spannungsdifferenz an den Stromklemmen und dem Strom hinreichend genau als konstant anzusehen und bei beiden Wattmetern — soferne dieselbe gleicher Konstruktion sind — dieselbe. Bei der Spannungsmessung ist dies aber nur der Fall, wenn bei beiden Wattmetern der Spannungsmeßbereich derselbe ist. Sei z. B. die Spannungsspule des einen Wattmeters auf 30 Volt, die des andern auf 120 Volt geschaltet, so haben wir folgende Verhältnisse:

Der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule beträgt 8.8 Millihenry. Für $\omega = 314$ ($z = 100$) ist $\omega L = 314 \times 8.8 \times 0.001 = 2.77\ \Omega_s$ (scheinbare Ω). Der Ohmsche Widerstand des Spannungsspulenkreises ist

$$\text{für } 30 \text{ Volt } R_{sp} = 1000\ \Omega,$$
$$\text{„ } 120 \text{ „ } R_{sp} = 4000\ \Omega.$$

Die Phasenverschiebung β zwischen dem Strom J_{sp} und der Spannung berechnet sich also

bei 30 Volt $\operatorname{tg} \beta = \frac{2.77}{1000} = 0.00277$; $\beta = 9.6$ Minuten,

„ 120 „ $\operatorname{tg} \beta = \frac{2.77}{4000} = 0.00069$; $\beta = 2.4$ Minuten.

Dementsprechend sind die gemessenen Werte von ψ_e zu korrigieren. Bei der Anbringung der Korrektur hat man zunächst auf irgend welche Weise (z. B. durch Rechnung) festzustellen, ob ψ_e positiv oder negativ ist. Für den letzteren Fall sei das Diagramm gezeichnet:

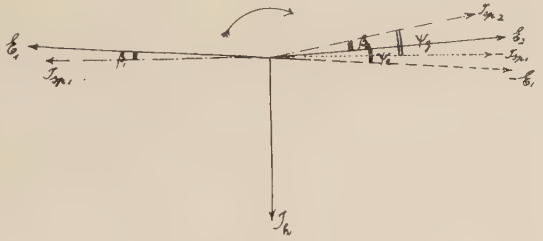


Fig. 29.

Der tatsächlich vorhandene Winkel sei $= \psi_e$,
„ gemessene Winkel „ $= \psi_g$.

Aus der Figur:

$$\psi_g = \psi_e - \beta_1 + \beta_2$$
$$\psi_e = \psi_g - (\beta_2 - \beta_1).$$

Für den 2. Fall, ψ_e positiv, ergibt sich auf dieselbe Weise

$$\psi_e = \psi_g + (\beta_2 - \beta_1)$$

Ist β_1 größer als β_2, so lauten die Formeln

$\psi_e = \psi_g + (\beta_1 - \beta_2)$ wenn ψ_e negativ,
$\psi_e = \psi_g - (\beta_1 - \beta_2)$ „ ψ_e positiv.

Versuchsergebnisse.

a) In ihrem ganzen Verlauf wurde die $\psi_e =$ Kurve aufgenommen an dem schon früher erwähnten Wechselspannungswähler für $w_1 = w_2 = 80$ Windungen. Die Schaltung Fig. 28 wurde in entsprechender Weise (Ersatz der Transformatoren T_4 und T_5 durch einen Spannungsteiler) geändert. p_e wurde aus den schon genannten Gründen nicht gemessen.

$\varrho_1 = \varrho_2 = 0.23\ \Omega$

E_{1k}	J_h	α_{w1}	C_{w1}	W_1	sin ψ_e	ψ_e Min.	r_2
6.15	2.75	0.3	0.5	0.15	0.0089	+ 31	1000 Ω
7.55	2.75	0.3	,,	0.15	0.0072	+ 25	,,
9.9	2.76	0.3	,,	0.15	0.0055	+ 19	,,
12.4	2.75	0.3	,,	0.15	0.0044	+ 15	,,
14.7	2.78	0.3	,,	0.15	0.0037	+ 13	,,
17.8	2.79	0.4	,,	0.20	0.0040	+ 14	,,
20.5	2.78	0.5	,,	0.25	0.0044	+ 15	,,
22.8	2.81	0.6	,,	0.30	0.0047	+ 16	,,
24.6	2.81	0.6	,,	0.30	0.0044	+ 15	,,
26.8	2.82	0.7	,,	0.35	0.0047	+ 16	,,
28.7	2.85	0.8	,,	0.40	0.0049	+ 17	,,
33.5	3.12	1.0	,,	0.50	0.0048	+ 17	,,
39.7	2.91	1.4	,,	0.70	0.0060	+ 21	,,
39.7	2.92	0.7	1.0	0.70	0.0060	+ 21	2000 Ω
43.0	2.68	0.8	,,	0.80	0.0069	+ 24	,,
45.9	2.92	1.0	,,	1.0	0.0075	+ 26	,,
49.5	2.89	1.3	,,	1.3	0.0091	+ 31	,,
53.8	2.48	1.6	,,	1.6	0.0120	+ 41	,,
57.6	2.62	2.4	,,	2.4	0.0174	+ 61	,,

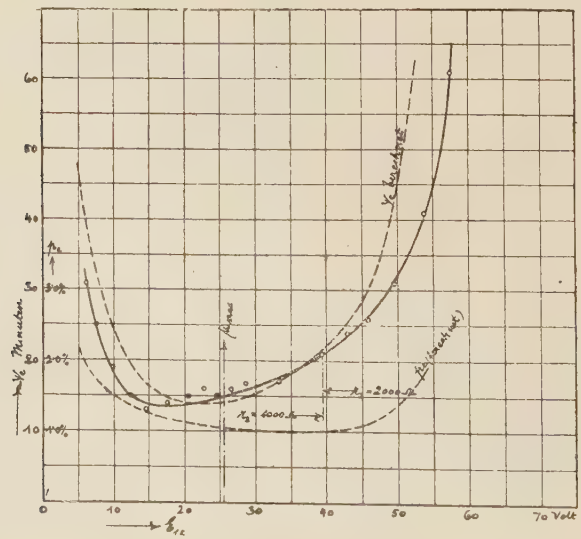


Fig. 30.

In der graphischen Darstellung ist ψ_e als Funktion von E_{1k}, das ja annähernd gleich E_{2k} ist, aufgetragen. Die strichliert eingetragenen Kurven in Fig. 30, sowie auch 31 u. 32 sind die Darstellung der nach den Formeln für p_e und sin ψ_e auf Seite 21/22 berechneten Werte. Hierüber wird weiter unten die Rede sein.

b) Meßtransformator $\frac{1000}{100}$ Volt.

$w_1 = 2000$,
$w_2 = 200$,
$\varrho_1 = 85\ \Omega$,
$\varrho_2 = 1.45\ \Omega$,
$q = 41.4$ cm² netto,
$l = 71$ cm,
r_2 von 730 Ω bis 470 Ω geändert.

c) desgl.

$r_2 = 150.6\ \Omega$ konstant.

α_{el}	C_{el}	E_{1k}	E_{2k}	J_h	α_{wl}	C_{wl}	W_1	R_{sp1}	R_{sp2}	R_e	sin ψ_g	Min. ψ_g	$E_1 \frac{w_2}{w_1} - E_2$	p_e %	Min. β_1	Min. β_2	Min. $\beta_2 - \beta_1$	Min. ψ_e	r_2
41.4	2.0	82.8	—	4.98	0.9	5.0	4.5	5000	1000	10000	0.0109	41.0	—	—	1.9	9.6	7.7	48.7	470 Ω
56.8	,,	117.6	—	4.98	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0085	29.2	—	—	1.9	9.6	7.7	36.9	,,
77.2	,,	154.4	—	4.98	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0065	22.5	—	—	1.9	9.6	7.7	30.2	,,
100.0	,,	200.0	—	4.98	0.5	10.0	5.0	10000	,,	,,	0.0051	17.7	—	—	1.0	9.6	8.6	26.3	,,
120.4	,,	240.8	—	4.98	0.4	,,	4.0	,,	,,	,,	0.0034	11.9	—	—	1.0	9.6	8.6	20.5	,,
65.0	5.0	325	—	4.98	0.4	,,	4.0	,,	,,	25000	0.0025	8.8	—	—	1.0	9.6	8.6	17.4	,,
56.9	6.8	387	38.1	4.92	0.3	19.0	6.7	19000	2000	34000	0.0030	10.4	0.6	1.6	0.5	4.8	4.3	14.7	616 Ω
57.4	,,	390	38.1	4.91	0.4	,,	7.6	,,	4000	,,	0.0040	14.0	0.9	2.4	0.5	2.4	1.9	15.9	730 Ω
71.0	,,	483	47.6	4.90	0.4	,,	7.6	,,	,,	,,	0.0032	11.0	0.7	1.5	0.5	2.4	1.9	12.9	,,
78.8	,,	536	52.6	4.91	0.4	,,	7.6	,,	,,	,,	0.00290	10.0	1.0	1.9	0.5	2.4	1.9	11.9	,,
89.5	,,	609	59.6	4.00	0.4	,,	7.6	,,	,,	,,	0.00255	8.9	1.3	2.14	0.5	2.4	1.9	10.8	,,
81.5	8.6	700	68.8	4.95	0.3	28.0	8.4	28000	,,	43000	0.00243	8.4	1.2	1.64	0.3	2.4	2.1	10.5	,,
94.0	,,	808	79.7	4.98	0.3	,,	8.4	,,	,,	,,	0.00210	7.2	1.1	1.4	0.3	2.4	2.1	9.3	,,
105.3	,,	905	89.7	4.92	0.2	,,	5.6	,,	,,	,,	0.00108	3.8	1.0	1.1	0.3	2.4	2.1	5.9	,,
115.5	10.4	1201	119.0	4.92	0.2	37.0	7.4	37000	,,	52000	0.00125	4.3	1.1	0.9	0.3	2.4	2.1	6.4	,,
93.9	,,	977	96.8	4.92	0.2	,,	7.4	,,	,,	,,	0.00154	5.3	0.9	0.9	0.3	2.4	2.1	7.4	,,

Bemerkung: Wo E_{2k} nicht gemessen werden konnte, wurde in Fig. 31 und 32 ψ_e als Funktion von $E_{1k} \cdot \frac{w_2}{w_1}$ aufgetragen.

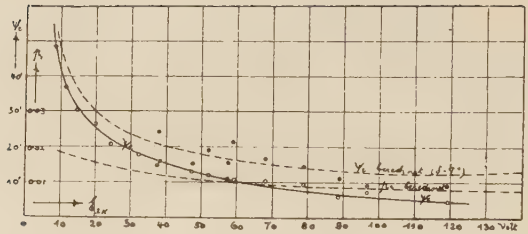


Fig. 31.

α_{e1}	C_{e1}	E_{1k}	E_{2k}	J_h	α_{w1}	C_{w1}	W_1	R_{sp1}	R_{sp2}	R_e	sin ψ_g	Min ψ_g	$\frac{w_2}{w_1}E_1 - E_2$	p_e %	Min. β_1	Min. β_2	Min. $\beta_2 - \beta_1$	Min. ψ_e	r_2
49.5	2.0	99.0	—	5.55	1.0	5.0	5.0	5000	1000	10000	0.0091	31.0	—	—	1.9	9 6	7.7	38.7	150.6Ω
63.1	,,	126.2	—	5.60	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0071	24.6	—	—	,,	,,	,,	32.3	,,
66.0	,,	132.0	—	5.65	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0067	23.0	—	—	,,	,,	,,	30 7	,,
72.7	,,	145.4	14.10	,,	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0061	21.0	4.4	3.1	,,	,,	,,	28.7	,,
80.0	,,	160.0	15.50	,,	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0055	19.0	5.0	3.1	,,	,,	,,	26.7	,,
89.0	,,	178.0	17.37	,,	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0050	17.1	4.3	2.5	,,	,,	,,	24.8	,,
99.6	,,	199.2	19.50	,,	1.0	,,	5.0	,,	,,	,,	0.0044	15.2	4.2	2.1	,,	,,	,,	22.9	,,
100.1	,,	200.2	19.56	,,	0.4	10.0	4.0	10000	,,	,,	0.0035	12.2	4.6	2.3	1.0	,,	8.6	20.8	,,
111.5	,,	223.0	21.81	,,	0.4	,,	4.0	,,	,,	,,	0.0032	11.0	4.9	2.2	,,	,,	,,	19.6	,,
125.0	,,	250.0	24 40	,,	0.4	,,	4.0	,,	,,	,,	0.0028	9.7	6.0	2.5	,,	,,	,,	18.3	,,
53.2	5.0	266.0	26.0	,,	—	,,	—	,,	,,	25000	—	—	6.0	2.3	,,	,,	,,	—	,,
55.3	,,	277.5	27.15	,,	0.3	,,	3.0	,,	,,	,,	0.0019	6.7	6.0	2.2	,,	,,	,,	15.3	,,
63.7	,,	318.5	31.12	4.68	0.4	,,	4.0	,,	2000	,,	0.0027	9.3	7.3	2.3	,,	4.8	3.8	13.1	,,
74.7	,,	373.5	36.6	5.36	0.4	,,	4.0	,,	,,	,,	0.0020	7.0	7.5	2.0	,,	4.8	3.8	10.8	,,
87.9	,,	439.5	43.3	,,	0.2	19 0	3.8	19000	,,	,,	0.0016	5.5	6.5	1.5	0.5	,,	4 3	9.8	,,
102.9	,,	514.5	49.7	,,	0.2	,,	3.8	,,	,,	,,	0.0014	4.8	17.5	3.5	,,	,,	,,	9.1	,,
120.8	,,	604.0	59.1	5.32	0.1	,,	1.9	,,	,,	,,	0.0006	2.2	13	2 2	,	,,	,,	6.5	,,
121.7	,,	608.5	59.3	,,	±0	28.0	±0	28000	,,	,,	±0	±0	16	2.7	,,	,,	,,	4.3	,,
99.8	6.8	678	66.5	,,	±0	,,	±0	,,	,,	34000	±0	±0	15	2.3	0.3	,,	4.5	4.5	,,
121 2	,,	825	80.5	,,	−0.1	,,	−2.8	,,	,,	,,	−0.0006	−2.2	20	2 5	,,	,,	4.5	2.3	,,
121.3	8.6	1041	102.1	,,	−0.2	,,	−5.6	,,	,,	43000	−0.0010	−3.4	20	1.95	,,	,,	4.5	1.1	,,
106.3	10.4	1106	108.6	,,		37.0	−7.4	37000	4000	52000	−0.0013	−4.6	20	1.85	,,	2.4	2.1	−2 5	,,
116.2	,,	1210	118.9	4.99	−0.2	,,	−7.4	,,	,,	,,	−0.0012	−4.4	21	1.75	,,	,,	,,	−2.3	,,

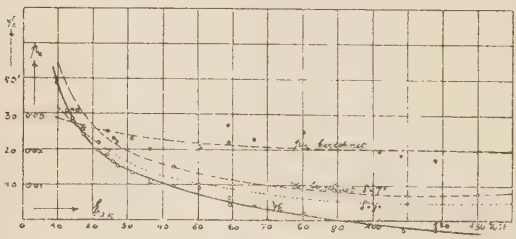


Fig. 32.

Daß die Werte von p bei den letzten Versuchen nicht in wünschenswerter Weise auf einem Kurvenzug liegen, dürfte davon herrühren, daß die Maschinenspannung nicht konstant blieb und das im Primärkreis verwendete elektrodynamische Voltmeter auf Spannungsschwankungen schneller reagierte als das Hitzdrahtvoltmeter im Sekundärkreis. Die strichlierten Kurven sind die berechneten Werte.

Aufnahme von Strom- und Spannungskurven mittels Kontaktmacher.

Um eine etwaige durch die Transformation verursachte Verzerrung der Kurvenform feststellen zu können, wurden sowohl Strom- als auch Spannungswandler mit einem Franke'schen Kontaktmacher untersucht. Die Kurven wurden nicht mit der Schreibvorrichtung, sondern punktweise aufgenommen. Zur Eliminierung der sehr erheblichen Thermoströme wurde für jeden Punkt kommutiert und das Mittel der beiden Ausschläge des Galvanometerlichtzeigers genommen. Die Ausschläge waren über den verwendeten Teil der Skala hinreichend genau proportional dem Strom bezw. der Spannung. Der Kontaktmacher wurde getrennt von der Maschine durch einen kleinen zweipoligen Synchronmotor angetrieben.

3. Aufnahme von Stromkurven.

Hiezu wurde folgende Schaltung benützt:

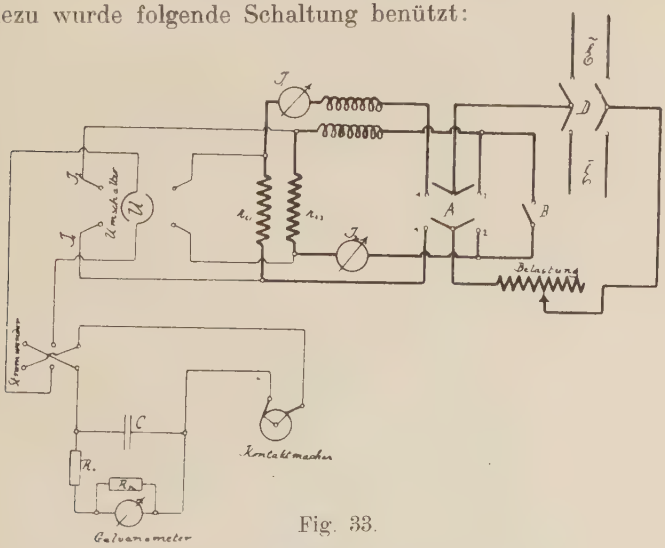


Fig. 33.

Zu dieser sei noch folgendes bemerkt:

Der Hebel A liegt beim Arbeiten mit Wechselstrom in der Stellung 1 : 1, durch Hebel B ist gleichzeitig der Sekundärkreis des Stromwandlers geschlossen. Für die Gleichstromeichung wird zunächst Hebel D auf E gelegt, für die Eichung der J_1 = Kurve liegt A auf 1 : 1, für die Eichung der J_2 = Kurve auf 2 : 2, gleichzeitig ist Hebel B zu

öffnen. Die Widerstände r_{i1} und r_{i2} bestanden aus Manganinband: zur weiteren Variierung der Empfindlichkeit diente sowohl der Kondensator C mit Stufen von 0.01 ÷ 0.5 Mikrofarad, als auch der Vorschaltwiderstand R_v, der aber stets zwischen 30000 und 100000 Ω betrug. Um das Galvanometer nahezu aperiodisch zu dämpfen, war der Widerstand R_n parallel dazu geschaltet. Die Spannung an den Enden von r_{i1} und r_{i2} betrug 0.01 ÷ 0.1 Volt.

Nach Fig. 2 ist $\dot{J}_2 = \dot{J}_1 \frac{w_1}{w_2} - \dot{J}_0 \frac{w_1}{w_2} = (\dot{J}_1 - \dot{J}_0) \frac{w_1}{w_2}$ geometrisch subtrahiert (durch Punkte über den betr. Größen bezeichnet).

Fig. 34.

Hat der Strom J_1 reine Sinusform, so kann J_2 nur dann ebenfalls nach einer Sinuskurve verlaufen, wenn der Magnetisierungsstrom J_0 nach einer Sinuskurve verläuft. In Fig. 34 u. 35 sind für einen eisengeschlossenen Transformator (Spannungswähler), in Fig. 36 und 37 für den Stromwandler von Siemens & Halske die Kurvenform des Magnetisierungsstromes J_0 für verschiedene Maximalinduktionen dargestellt. Diese Diagramme sollen nur die charakteristische Form der Kurven zeigen, die Lage des Maximums gegen die Abscissenachse etc. kann daraus nicht entnommen werden.

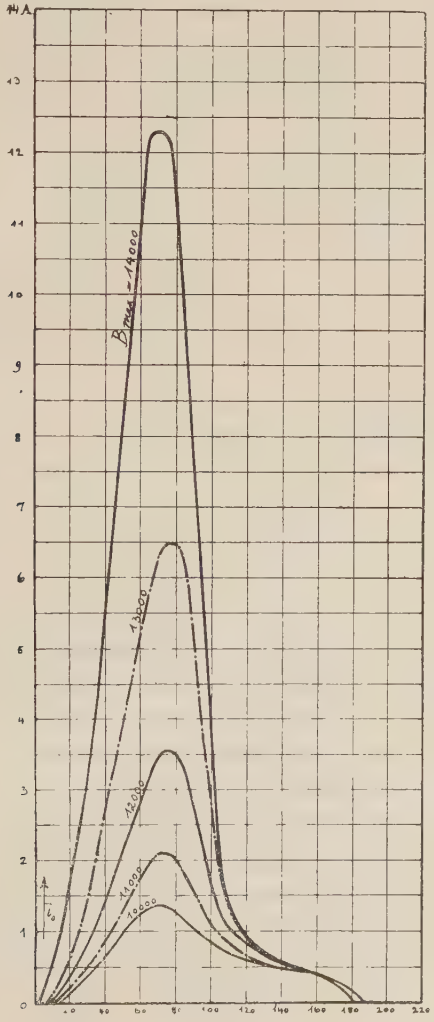


Fig. 35.

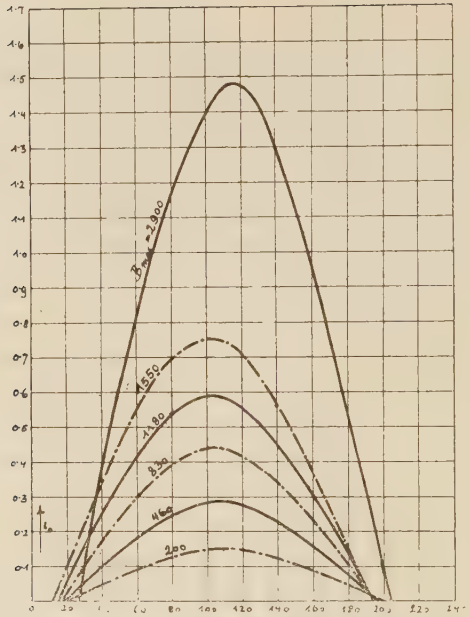

1·7
1·6
1·5
1·4
1·3
1·2
1·1
1·0
0·9
0·8
0·7
0·6
0·5
0·4
0·3
0·2
0·1
B_{max} = 2900
1550
1180
830
460
200
i_0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240

Fig. 36.

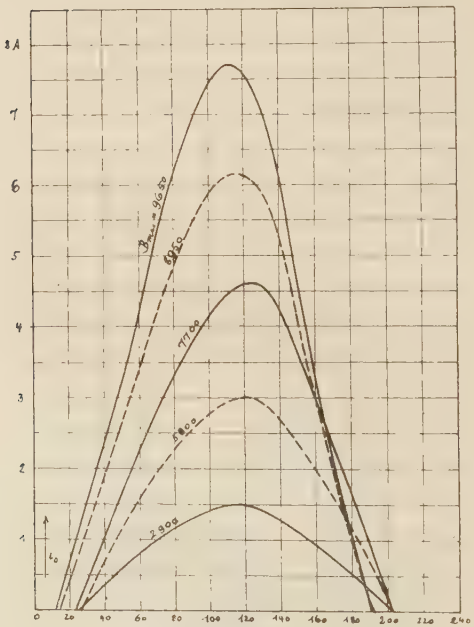

8A
7
6
5
4
3
2
1
B_{max} = 9650
8950
7700
5800
2900
i_0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240

Fig. 37.

Für beide untersuchte Apparate ergibt sich das Resultat, daß J_0 nur bei kleineren Induktionen annähernd Sinusform hat, bei großen Induktionen weicht J_0 stark von der Sinusform ab, auch bei dem Stromwandler von Siemens & Halske, bei dem die Ampèrewindungen zu einem großen Teil zur Überwindung des magnetischen Widerstandes einer Luftstrecke verwendet werden. Wenn man indessen bedenkt, daß J_0 gegenüber J_1 bei praktisch ausgeführten modernen Stromwandlern ohne Luftfugen höchstens 1 : 2% von J_1 beträgt, so ergibt sich für solche Stromwandler auch bei höheren Induktionen keine nennenswerte Abweichung der sekundären Kurvenform von der primären.

Nachstehend sind einige Versuche, wie sie an den schon früher erwähnten Stromwandlern aufgenommen wurden.

a) Spannungswähler $w_1 = w_2 = 20$

$J_1 = 1.04$ Amp., konform der 3 = Phasenspannung des rotierenden Umformers (ältere Maschine von Brown & Boveri)

$J_2 = 0.154$ Amp.

$r_2 = 1.4\ \Omega$

$z = 106$ Wechsel

$p_i = \frac{J_1 - J_2}{J_2} = 8.5$, aus der Kurve $\psi_i \doteq 72°$.

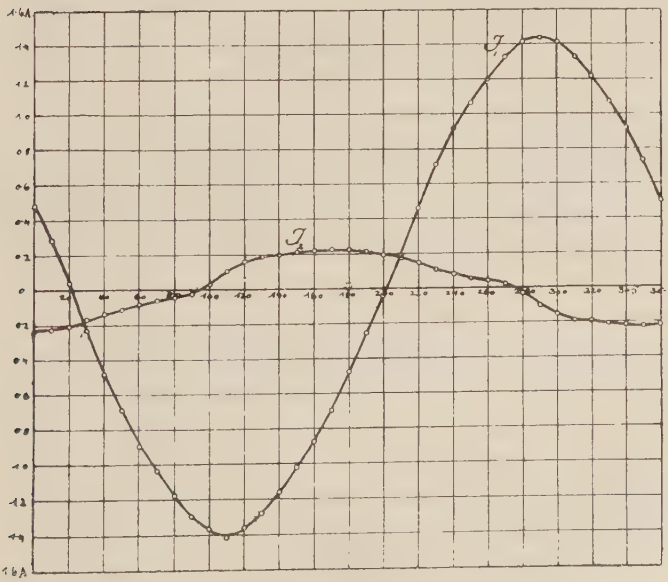


Fig. 38.

b) desgl. $w_1 = w_2 = 20$

$J_1 = 5.6$ Amp., konform der $4 = \varphi$ Spannung

$J_2 = 4.25$ Amp.

$r_2 = 0.20\ \Omega$

$z = 106$ Wechsel

$p_i = \frac{1.35}{4.25} = 0.318$; aus der Kurve $\psi_i = 12°$.

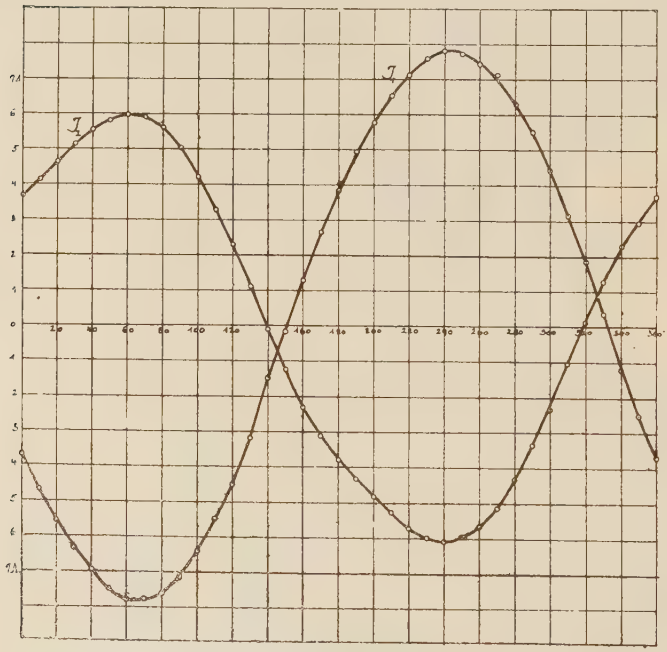


Fig. 39.

Im Gegensatz zu Versuch a) nähert sich hier J_2 schon mehr der J_1 = Kurve. Das Maximum von J_2 ist aber nach links von der Mitte verdrückt.

c) Desgl. $w_1 = w_2 = 20$

$J_1 = 5.73$ Amp., konform der $12 = \varphi$ Spannung

$J_2 = 4.48$ Amp.

$r_2 = 0.20\ \Omega$

$z = 100$ Wechsel

$p_i = \frac{1.25}{4.48} = 0.28$; aus der Kurve $\psi_i = 10^0$.

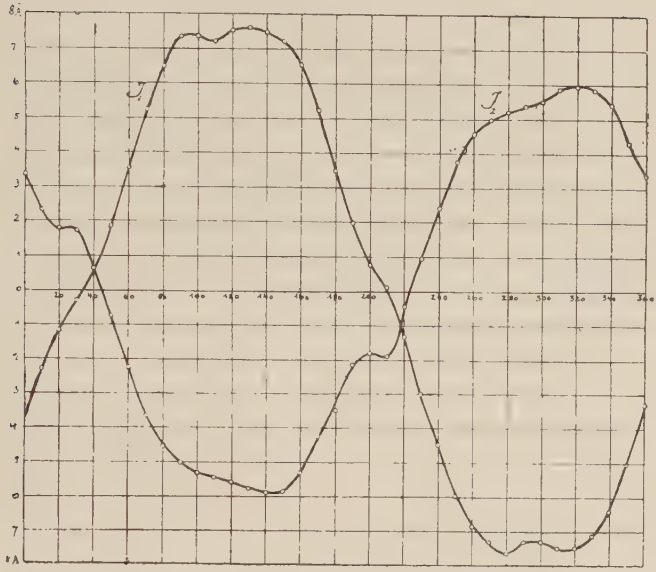


Fig. 40.

Diese Kurve wurde stark verzerrt. Besonders auffallend ist das Auftreten eines Höckers in der J_2= Kurve, wo in der J_1= Kurve keiner vorhanden war. Deutlicher wird diese eigenartige Verzerrung noch in den folgenden Kurven.

d) Desgl. $w_1 = w_2 = 20$

$J_1 = 5.17$ Amp. (Leerlaufstrom eines sekundär offenen Transformators bei $B_{max} = 14000$)

$J_2 = 3.97$ Amp.

$r_2 = 0.20\ \Omega$

$z = 100$ Wechsel

$p_i = \frac{1.20}{3.97} = 0.30$; $\psi_i = 23^0$ aus der Kurve.

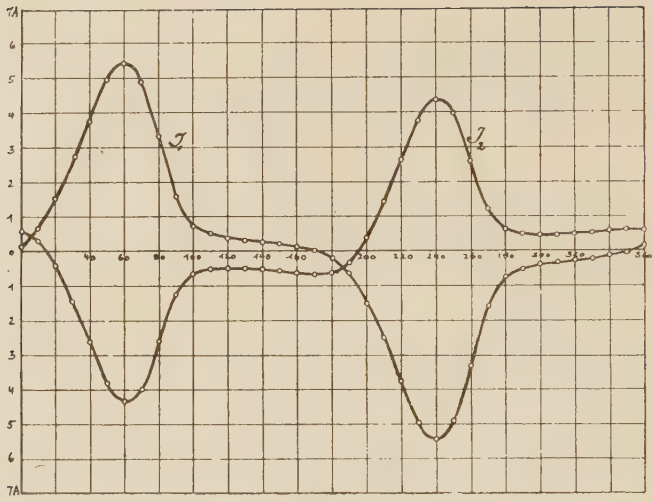


Fig. 41.

c) Desgl. $w_1 = w_2 = 20$, r_2 vergrößert.

$J_1 = 5.18$ Amp.

$J_2 = 3.45$ Amp.

$r_2 = 0.80\ \Omega$; $\varphi_1 = 23^0$ aus der Kurve.

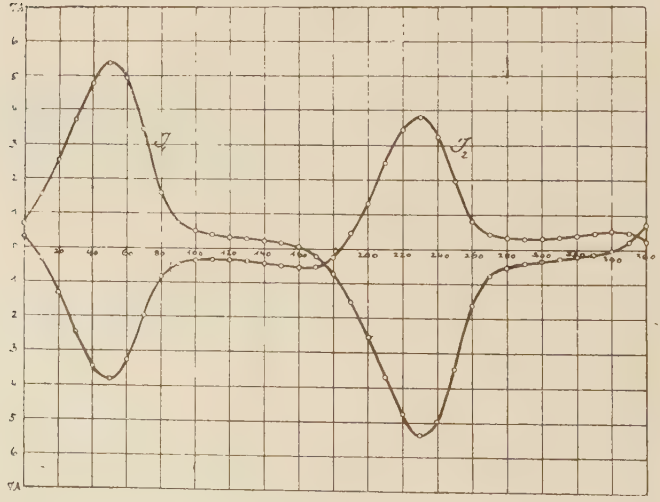


Fig. 42.

Die Einbuchtung bei 100° der Kontaktmacherteilung ist noch ausgesprochener als bei Fig. 41.

Namentlich der Verlauf der Kurven d) und e) ist interessant. Obwohl $\psi = 23°$ beträgt, ist der Kurvenscheitel zeitlich nicht verschoben, wenn auch der Scheitelwert von J_2 bedeutend kleiner ist. Dagegen sind die Momentanwerte von J_2 zwischen 120° und 160° der Kontaktmacherteilung größer als die von J_1. Zerlegt man die beiden Kurven nach der Methode von Fischer-Hinnen in ihre höheren Harmonischen, so läßt sich nur mit Sicherheit feststellen, daß die 3. Harmonische besser abgebildet ist, d. h. kleineres p_i hat als die erste Harmonische. Die höheren Harmonischen sind zu klein, als daß ihre Amplitude mit genügender Genauigkeit ermittelt werden könnte. Ein allgemein gültiges Resultat ist aber aus einer solchen Kurvenanalyse auch nicht zu erwarten. Denn die Frage, ob die höheren Harmonischen besser oder schlechter abgebildet werden als die Grundwelle, läßt sich nicht allgemein beantworten. Bei gleichem Effektivwert ist dies allerdings angenähert der Fall, handelt es sich aber um Oberschwingungen sehr kleiner Amplitude, so können p_i und ψ_i ungünstiger werden als bei der Grundwelle.

f) Spannungswähler $w_1 = w_2 = 200$
$J_1 = 0.99$ Amp., konform der Dreiphasenspannung der Maschine
$J_2 = 0.98$ Amp., ungenau, weil J_1 nicht konstant blieb.
$r_2 \doteq 0.20\ \Omega$
$z = 100$
$\psi_i \doteq 3°$ aus der Kurve (Fig. 43).

g) desgl. $J_1 = 4.66$ Amp., konform der $12 = \varphi$ Spannung
$J_2 = 4.58$
$r_2 \doteq 0.20\ \Omega$
$z = 100$
$\psi_i \doteq 2°$ aus der Kurve
$p_i \doteq \frac{0.08}{4.58} = 0.017$ (Fig. 44).

h) desgl. $J_1 = 5.17$ Amp., Magnetisierungsstrom
$J_2 = 5.00$ Amp.
$r_2 = 0.20\ \Omega$
$z = 100$
$\psi_i \doteq 4°$ aus der Kurve
$p_i \doteq 0.034$ (Fig. 45).

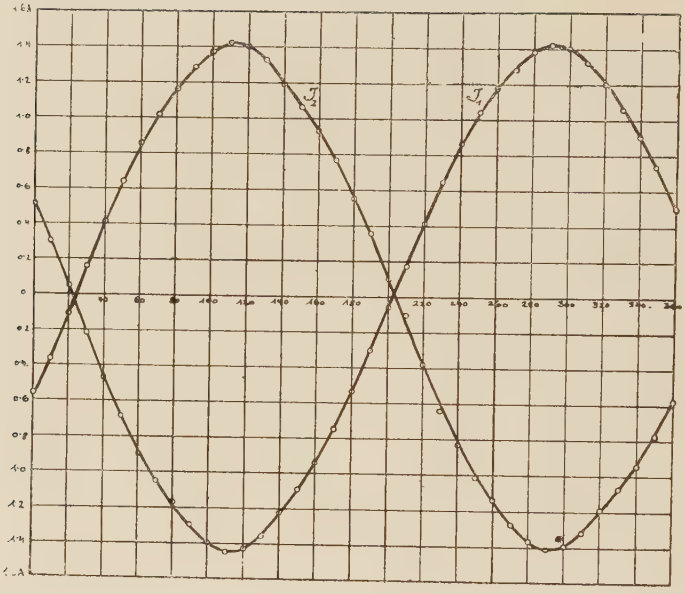


Fig. 43.

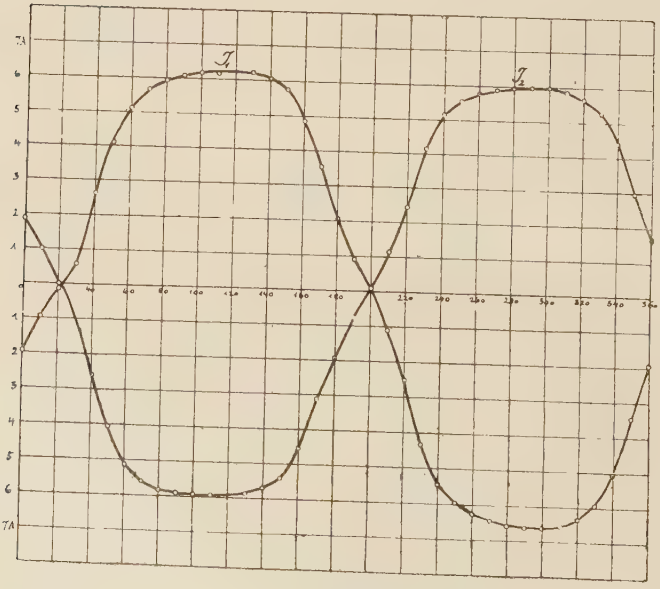


Fig. 44.

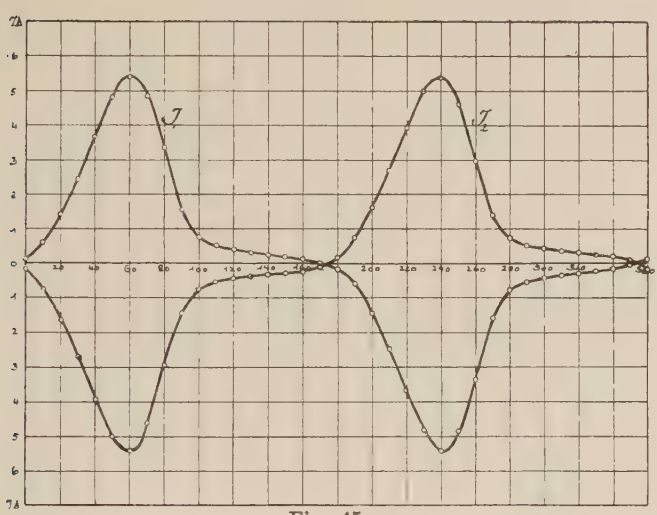


Fig. 45.

Bei diesen drei Versuchen liegen die Abweichungen der sekundären Kurvenform von der primären bereits außerhalb der Beobachtungsgenauigkeit.

i) Stromwandler von Siemens & Halske

$w_1 = 200$; $w_2 = 318$ z $= 100$, konstant

$J_1 = 0.543$ Amp.; $J_1 \frac{w_1}{w_2} = 0.342$ Amp.

$J_2 = 0.30$ Amp.

$r_2 = 1.40\ \Omega$

$\psi_i = 8^0$ aus der Kurve

$p_i = \frac{0.42}{0.30} = 0.14$ (Fig. 46)

k) desgl. $J_1 = 5.08$ Amp.; $J_1 \frac{w_1}{w_2} = 3.20$ Amp.

$J_2 = 2.93$ Amp.

$r_2 = 0.20\ \Omega$

$\psi_i = 2^0$ aus der Kurve

$p_i = \frac{0.27}{2.93} = 0.092$ (Fig. 47)

l) desgl. $J_1 = 5.38$ Amp.; $J_1 \frac{w_1}{w_2} = 3.38$ Amp., Magnetisierungsstrom

$J_2 = 3.15$ Amp.

$r_2 = 0.20\ \Omega$

$\psi_i = 6^0$ aus der Kurve

$p_i = \frac{0.23}{3.15} = 0.073$ (Fig. 48)

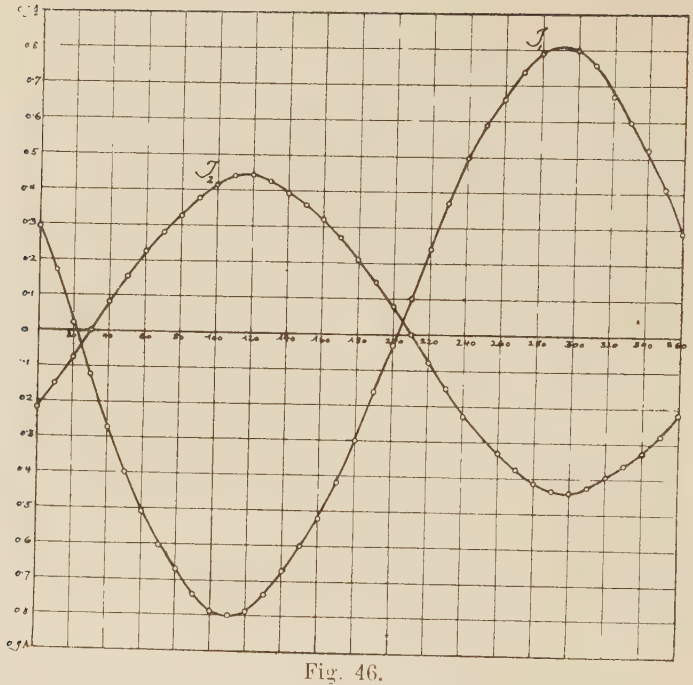


Fig. 46.

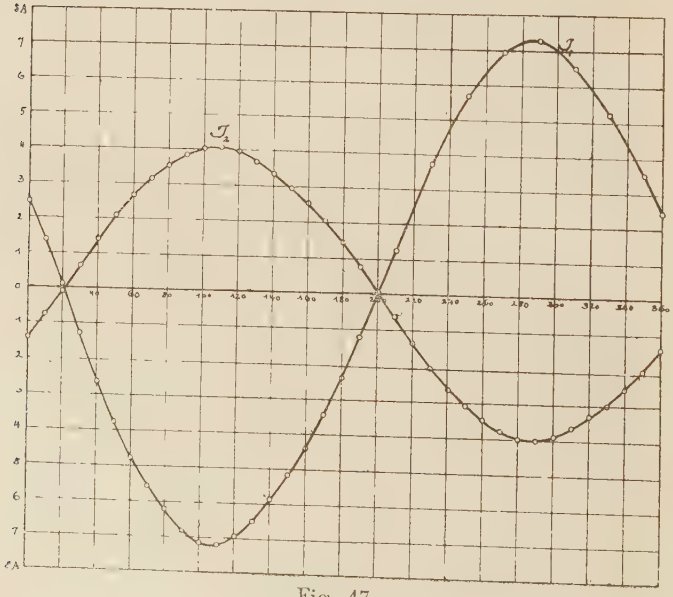


Fig. 47.

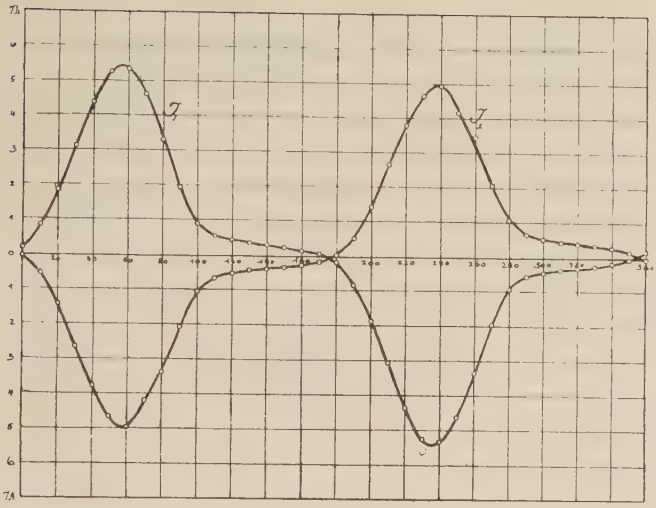


Fig. 48.

Wie schon aus den direkten Bestimmungen von p und ϑ, so geht auch aus diesen Versuchen hervor, daß dieser Stromwandler dem Spannungswähler als Stromwandler mit $w_1 = w_2 = 200$ beträchtlich unterlegen ist.

4. Kurvenaufnahmen bei Spannungswandlern.

Hinsichtlich der zu erwartenden Verzerrung der Kurvenform läßt sich bei Spannungswandlern dieselbe Überlegung anstellen wie bei Stromwandlern.

Nach Fig. 10 ist bei induktionsfreier Belastung

$$E_{2k} = E_{1k}\frac{w_2}{w_1} - \overline{EF} - \overline{DC''}$$

$$= E_{1k}\frac{w_2}{w_1} - J_0\varrho_1\frac{w_2}{w_1}\frac{\cos(\varphi-\delta)}{\cos\delta} - J_2\varrho_2 - J_2\varrho_1\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$$

Für induktionsfreie und oft auch für induktive Belastung ist die Stromkurve von J_2 sehr angenähert sinusförmig, wenn E_{1k} nach einer Sinuskurve verläuft. Durch den Sekundärstrom bezw. seinen Spannungsabfall ist also keine Verzerrung der Kurvenform zu erwarten. Dagegen weicht J_0 bei den in Betracht kommenden großen Induktionen stark

von der Sinuskurve ab. Der Spannungsabfall $J_0 \varrho_1 \frac{w_2}{w_1} \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\cos \delta}$ ist also nie sinusförmig (weil konform mit der J_0 = Kurve) und deshalb kann die Sekundärspannung niemals theoretisch genau dieselbe Kurvenform haben wie die Primärspannung. Da aber der vom Magnetisierungsstrom herrührende Spannungsabfall kaum jemals mehr als 1 % betragen wird, so bleibt der von ihm herrührende Spannungsabfall praktisch ohne jeden merkbaren Einfluß auf die Kurvenform.

Auch für die Spannungstransformation wurde eine Reihe von Kurvenaufnahmen gemacht und zwar an einem Wechselspannungswähler mit $w_1 = w_2 = 80$ bezw. 200 Windungen. Da p_e und ε''_e sehr klein waren, so ergab sich fast nie eine mit Sicherheit festzustellende Verzerrung oder Phasenverschiebung, obwohl das Eisen bis zu $B_{max} = 13500$ beansprucht wurde. Es seien deshalb nur zwei von der Sinusform stark abweichende Kurven wiedergegeben für $w_1 = w_2 = 80$ Windungen. Für die Aufnahme der Spannungskurven wurde folgende Schaltung benützt:

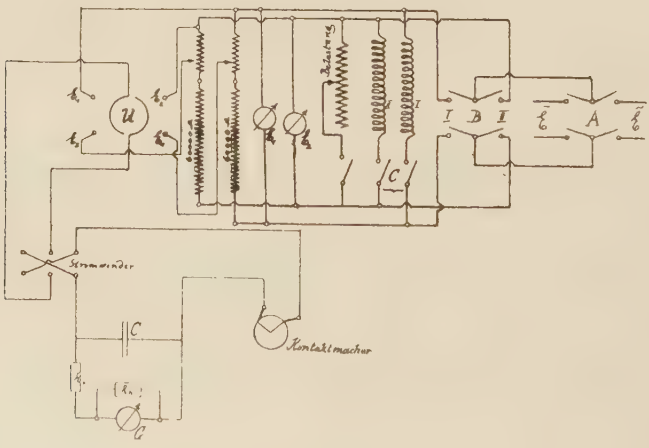


Fig. 49.

Hiezu sei noch folgendes kurz bemerkt:

Der Doppelhebel A dient dazu, die Meßanordnung mit der Gleichspannung E oder der Wechselspannung $\widetilde{E}$ zu beschicken. Hebel B hat den Zweck, diese Spannung auf die Primär- oder Sekundärseite des Spannungswandlers zu legen. Bei der Eichung mit der Gleich-

spannung $\bar{E}$ muß der Schalter C vorher geöffnet werden, damit nicht Kurzschluß eintritt. Der übrige Teil der Schaltung ist genau so zusammengesetzt wie die entsprechende für Stromwandleruntersuchungen.

m) Spannungswähler $w_1 = w_2 = 80$

$E_1 \doteq E_2 = 40$ Volt

$\varrho_1 = \varrho_2 = 0.24\ \Omega$

$r_2 \doteq 60000\ \Omega$, Sekundäre Leistung 0.03 Watt.

$z = 100$ Wechsel (Fig. 50).

n) Desgl. $w_1 = w_2 = 80$

$E_{1k} \doteq 40$ Volt

$E_{2k} \doteq 39$ Volt

$\varrho_1 = \varrho_2 = 0.24\ \Omega$

$r_2 \doteq 16\ \Omega$ ($J_2 = 2.5$ Amp., Sekundäre Leistung 100 Watt)

$z = 100$ Wechsel (Fig. 51).

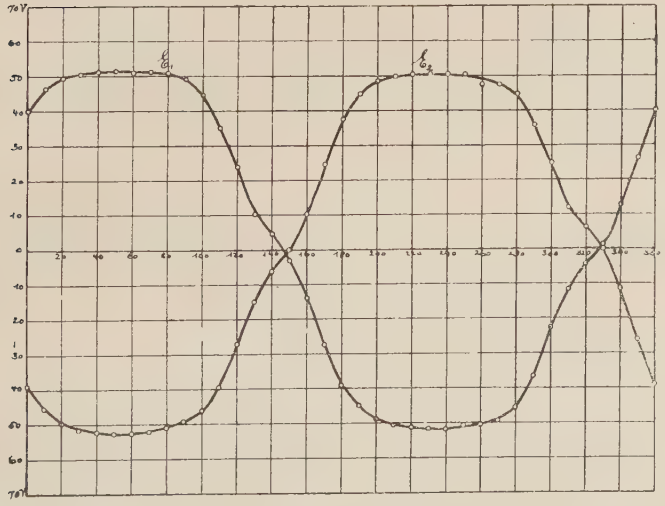


Fig. 50.

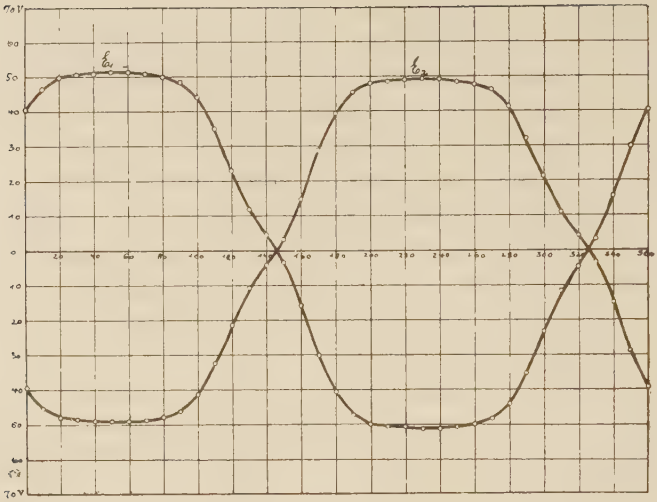


Fig. 51.

Abgesehen von einer kleinen Verkürzung der Ordinaten hat E_{2k} dieselbe Form wie E_{1k} und ist um ziemlich genau 180° gegen E_{1k} Phasen verschoben.

Nachdem im Vorstehenden die Ergebnisse der vorgenommenen Versuche niedergelegt sind, wird es interessieren, zu erfahren, wie weit die Versuchsresultate übereinstimmen mit den Zahlen, die man unter Benützung der Formeln für p und sin ψ erhalten würde. Zu diesem Zwecke müssen für die untersuchten Transformatoren μ, φ und δ bestimmt werden.

5. Ermittlung der für die Vorausberechnung von p und sin notwendigen Größen μ, φ, δ.

Die Permeabilität μ und den Winkel φ zwischen J_0 und J_h erhält man aus dem Leerlaufversuch an dem Transformator. Die Sekundärseite bleibt offen, an der Primärseite werden der Strom J_0, die zugeführte Spannung E_1 und die Leistung $W_1 = E_1 J_0 \cos \varphi$ gemessen. Die Maximalinduktion B_{max} erhält man bei hinreichend angenäherter Sinusform der Kurven aus der Gleichung für die elektromotorische Gegenkraft E_μ

$$E_\mu = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \; z \; B_{max} \; q \; w_1 \; 10^{-8} \text{ zu}$$

$$B_{max} = E_\mu \frac{10^8 \sqrt{2}}{z \; q \; w_1}, \text{ ferner}$$

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{J_\mu \; w_1}{l} = \frac{4\pi}{10} \frac{J_0 \sin \varphi \; w_1}{l}; \; \sin \varphi \text{ aus } W_1;$$

$$\mu = \frac{B^{max}}{H}$$

Bei den untersuchten Meßtransformatoren konnten aber W_1, E_1, J_0 nicht ohne weiteres für die Rechnung benützt werden, sondern mußten noch eine der verwendeten Schaltung entsprechende Korrektur erfahren, wie weiter unten ausgeführt werden wird.

Unter der Bestimmung von δ soll die Bestimmung jenes Winkels verstanden sein, der zwischen J_2 und E_{20} besteht, wenn der Transformator vollständig kurzgeschlossen, also $r_2 = 0$ ist. Daraus kann auch der Selbstinduktionskoeffizient des sekundären Streufeldes, $L_{2\sigma}$ ermittelt werden. Dieser „Kurzschlußversuch" wird so durchgeführt, daß man dem Transformator auf einer Seite die Spannung E_1 zuführt und die Sekundärseite über ein Ampèremeter J_2 kurzschließt. J_1, J_2, E_1, W_1 werden beobachtet, hieraus $\cos\delta$ berechnet. Da für den Versuch durch die Einschaltung des Ampèremeters J_2 der Sekundärwiderstand r_2 nie zu Null wird, muß δ stets noch eine Korrektur erfahren.

Ist δ klein, etwa unter 20°, so ist $\cos\delta$ zwischen 1.00 und 0.94. Da der Wattmeterausschlag oft klein ist, so kann auf keine hohe Genauigkeit gerechnet werden. Für diese Fälle ist weiter unten ein Meßverfahren angegeben, ähnlich dem für die Bestimmung von ψ', das die direkte Ermittlung von δ gestattet, allerdings auch nicht ohne die Anbringung von Korrekturen, aber immerhin mit größerer Genauigkeit als auf dem gewöhnlichen Wege.

Durchführung der Versuche.

a) Leerlaufversuch.

α) Spannungswähler

w_1 = 80 Windungen
l = 48 cm
q = 22.8 cm² netto
z = 100 Wechsel.

Schaltungsschema:

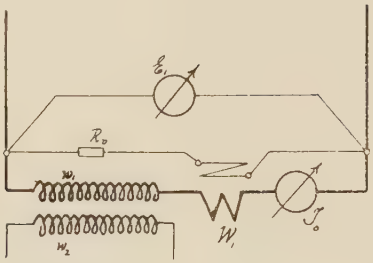


Fig. 52.

In dieser Schaltung ist J_0 richtig gemessen, dagegen ist die für die Berechnung von B_{max} in Betracht kommende elektromotorische Gegenkraft E_μ um den Ohmschen Spannungsabfall im Ampèremeter $J_0 R_a$, in der Stromspule des Wattmeters $J_0 R_w$ und $J_0 \varrho_1$ in der Wicklung des Transformators, sowie um den von der Selbstinduktion der Wattmeterstromspule herrührenden Spannungsabfall $J_0 \omega L$ zu groß gemessen. Die Verhältnisse werden durch folgendes Diagramm dargestellt:

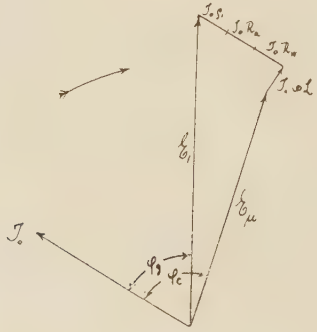
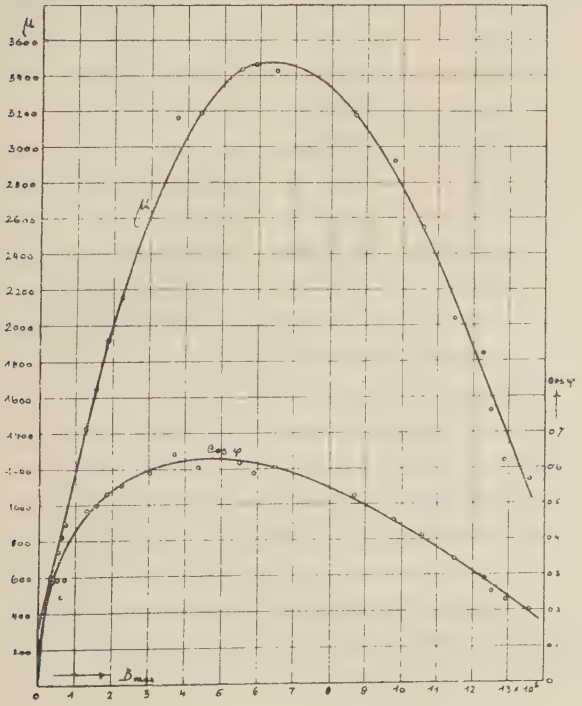


Fig. 53.

Gegeben sind die gemessene Spannung E_1, sowie J_0 und $\cos \varphi_g = \frac{W}{E_1 J_0}$, durch Zeichnung erhält man E_μ und die tatsächliche Phasenverschiebung φ_c.

E_1	J_0	α_w	C_w	W	Σr	$\Sigma J_0 r$	ωL	$J_0 \omega L$	$J_0 \cos \varphi_g$	aus Zeichnung φ_c	aus Zeichnung $E\mu$	$\cos \varphi_c$	$\sin \varphi$	B_{max}	H	μ
1.75	0.278	0.6	0.5	0.30	2.39 Ω	0.67	0.386 Ω_s	0.11	0.171	72 5	1.33	0.293	0.956	328	0.555	591
2.54	0.347	1.0	,,	0.50	,,	0.83	,,	0.13	0.196	73	2.06	0.293	0.956	509	0.690	740
3.50	0.408	1.5	,,	0.75	,,	0.98	,,	0.16	0.214	73.5	2.90	0.293	0.956	716	0.812	882
6.05	0.492	3.7	,,	1.85	,,	1.18	,,	0.19	0.306	61	5.18	0.485	0 875	1280	0.895	1430
7.2	0.524	4.6	,,	2.30	,,	1.25	,,	0.20	0.320	60	6.30	0.500	0.866	1560	0.945	1650
8.5	0.553	5.9	,,	2.95	,,	1.32	,,	0.21	0 347	58	7.55	0.530	0.848	1870	0.977	1910
9.9	0.607	7.2	,,	3.6	1.65 Ω	1.00	,,	0.23	0.361	57	9.15	0.555	0.832	2260	1.05	2150
13.2	0.696	11.8	,,	5.9	,,	1.15	,,	0.27	0.447	54	12.3	0.588	0.809	3020	1.17	2580
16.0	0.730	13.9	,,	7.95	,,	1.20	,,	0.28	0.496	50	15.0	0.643	0.766	3710	1.17	3160
18.9	0.830	20.1	,,	10.05	,,	1.40	,,	0.32	0.531	53	17.7	0.602	0 798	4380	1.37	3190
23.6	0.975	29.6	,,	14.8	,,	1.6	,,	0.4	0 63	52	22.3	0.616	0.788	5500	1.60	3430
25.5	1.01	32.0	,,	16.0	,,	1.7	,,	0.4	0.63	54	24.0	0.588	0.809	5900	1.70	3460
27.4	1.08	35.9	,,	17.95	1.13 Ω	1.2	,,	0.4	0.65	53	26.2	0.607	0.795	6500	1.79	3430
35.9	1.54	58.0	,,	29.0	,,	1.7	,,	0.6	0.81	58	35.2	0.525	0.851	8700	2.73	3180
41.6	1.81	34.3	1.0	34.3	,,	2.0	,,	0.7	0.83	62	39.6	0.455	0.891	9800	3.36	2920
45.4	2.19	41.0	,,	41.0	,,	2.5	,,	0.8	0.90	66	42.9	0.413	0.910	10600	4.15	2550
49.6	2.83	48.9	,,	48.9	,,	3.2	,,	1.1	0.985	70	46.4	0.349	0.938	11500	5.65	2040
50.6	3.37	24.7	2.0	49.4	0.54 Ω	1.8	0.096	0.3	0.98	73	49.8	0.290	0.957	12300	6.70	1840
52.7	4.08	27.6	,,	55.2	,,	2.2	,,	0.4	1.05	75	50.5	0.256	0.967	12500	8.21	1520
54.9	5.11	31.9	,,	63.8	,,	2.8	,,	0.5	1.16	77	52.1	0.228	0.973	12900	10.35	1240
58.4	5.84	35.2	,,	70.4	,,	3.1	,,	0.6	1.21	78	55.1	0.207	0.978	13600	11.90	1140



Die erhaltenen Werte von μ und cos φ_e sind in Fig. 54 als Funktion von B_{max} graphisch dargestellt.

Fig. 54.

β) Meßtransformator der E.-A.-G. „Helios".

$w_1 = 200$
$\varrho_1 = 1.44\ \Omega$
$l = 71$ cm
$q = 41.4$ cm² netto
$z = 100$.

Die verwendete Schaltung war die gleiche wie bei Versuch *α*.

E_1	J_0	α_w	C_w	W	Σr	$\Sigma J_0 r$	$J_0 \omega L$	$J_0 \cos \varphi_g$	φ_e	$\cos \varphi_e$	E''
2.15	0.080	0.20	0,5	0.10	3.61	0.29	0.03	0.047	60	0.500	1.96
2.38	0.087	0.25	„	0.125	„	0.31	0.03	0.052	59	0.515	2.19
2.68	0.094	0.30	„	0.15	„	0.34	0.04	0.056	59	0.515	2.45
3.08	0.103	0.35	„	0.175	„	0.37	0.04	0.057	62	0.469	2.86
3.32	0.110	0.40	„	0.20	„	0.40	0.04	0.060	63	0.454	3.09
3.49	0.116	0.45	„	0.225	„	0.42	0.05	0.064	62	0.469	3.23
3.79	0.122	0.50	„	0.25	„	0.44	0.05	0.066	62	0.469	3.52
5.64	0.163	1.00	„	0.50	„	0.59	0.06	0.089	62	0.469	5.25
6 58	0.179	1.35	„	0.675	„	0.65	0.07	0.102	60	0.500	6.18
7.52	0.191	1.70	„	0.85	„	0.69	0.07	0.113	58	0.530	7.08
8.46	0.202	2.00	„	1.00	„	0.73	0.08	0.118	58	0.530	7.96
9.40	0.216	2.40	„	1.20	„	0.78	0.08	0.128	57.5	0.537	8.88
10.33	0.228	2.85	„	1.425	„	0.82	0.09	0.138	56.5	0.552	9.72
11.28	0.234	3.25	„	1.625	„	0.84	0.09	0.144	55	0.574	10.70
12.22	0.244	3.90	„	1.95	„	0.88	0.10	0.159	52	0.616	11.56
13.16	0.253	4.30	„	2.15	„	0.91	0.10	0.163	52.5	0.609	12.48
13.90	0.260	4.85	„	2.425	„	0.94	0.10	0.174	51	0.629	13.20
14.93	0.269	5.15	„	2.57	„	0.97	0.10	0.172	52.5	0.609	14.22
16.00	0.281	6.00	„	3.00	„	1.02	0.11	0.187	50	0.643	15.25
16.90	0.289	6.45	„	3.23	„	1.04	0.11	0.191	51	0.629	16.12
17.86	0 297	7.00	„	3.50	„	1.07	0.12	0.196	51	0.629	17.1
18.80	0.304	7.60	„	3.80	„	1.10	0.12	0.202	51	0.629	17.9
20.65	0.321	8.90	„	4.45	„	1.16	0.13	0.215	50	0.643	19.7
22.60	0.331	10.40	„	5.20	„	1.20	0.13	0.230	47.5	0.676	21.6
24.80	0.349	11.80	„	5.90	„	1.26	0.14	0.238	49	0.656	23.8
28.30	0.376	14.50	„	7.25	„	1.36	0.15	0.256	48	0.670	27.2
37.6	0.441	22.9	„	11.45	„	1.6	0.17	0.304	47.5	0.676	36.4
47.0	0.487	16.1	1.0	16.1	„	1.75	0.19	0.343	46.5	0.688	45.5
56.4	0.540	21.4	„	21.4	„	1.95	0.21	0.380	46.0	0.695	54.9
65.8	0.592	27.5	„	27.5	„	2.1	0.23	0.417	46.0	0.695	64.1
75.2	0.635	33.1	„	33.1	„	2.3	0.25	0.441	46.5	0.688	73.2

E_1	J_0	α_w	C_w	W	Σr	$\Sigma J_0 r$	$J_0 \omega L$	$J_0 \cos \varphi_g$	φ_e	$\cos \varphi_e$	E_μ
84.6	0.67	40.0	1.0	40.0	2.42	1.6	0.26	0.473	Von hier ab φ_e und E_μ nicht mehr graphisch, sondern rechnerisch bestimmt, weil Korrektur klein.	0.707	83.6
94.0	0.71	31.4	1.5	47.1	„	1.7	0.28	0.500		0.707	92.3
103.4	0.77	36.85	„	55.3	„	1.9	0.30	0.535		0.695	101.5
108.0	0.80	39.4	„	59.1	„	1.9	0.21	0.547		0.684	106.1
112.8	0.82	42.6	„	63.9	„	2.0	0.32	0.565		0.692	110.8
117.4	0.84	45.4	„	68.1	„	2.0	0.33	0.580		0.690	115.4
122.2	0.85	29.0	2.5	72.5	„	2.1	0.33	0.593		0.700	120.1
126.8	0.90	31.0	„	77.5	„	2.2	0.35	0.612		0.680	124.6
131.6	0.93	32.8	„	82.0	„	2.2	0.36	0.622		0.670	129.4
136.2	0.96	35.05	„	87.6	„	2.3	0.37	0.642		0.670	133.9
141.0	1.01	37.05	„	92.6	„	2.4	0.39	0.657		0.650	138.6
148.1	1.08	40.25	„	100.6	„	2.5	0.42	0.680		0.630	145.6
157.8	1.17	44.8	„	112.0	„	2.8	0.45	0.710		0.607	155.0
167.5	1.26	49.0	„	122.4	„	3.0	0.49	0.73		0.580	164.5
177.2	1.34	53.3	„	130.9	„	3.2	0.52	0.74		0.550	174.0
177.2	1.37	44.4	3.0	133.1	„	3.3	0.54	0.75		0.550	174.0
186.8	1.53	48.3	„	145.0	„	3.7	0.60	0.78		0.507	183.1
196.5	1.66	52.2	„	156.7	„	4.0	0.65	0.80		0.480	194.5

ω L war während des ganzen Versuchs konstant $= 0.39\ \Omega_s$.

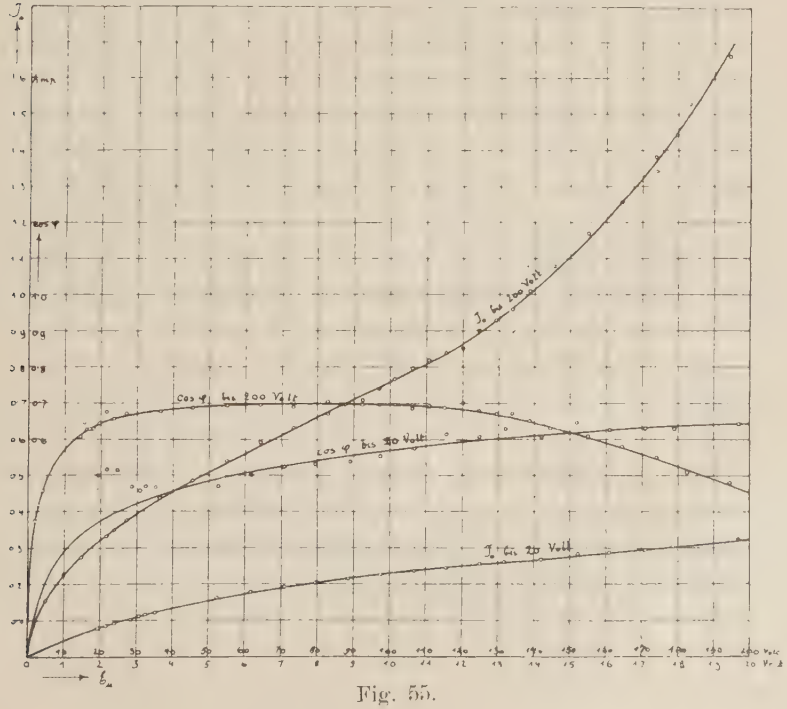


Fig. 55.

In Fig. 55 ist für diese Versuchsreihe J_0 und $\cos\varphi_e$ als Funktion von E_μ dargestellt und daraus die untenstehenden Werte durch Interpolation entnommen,

hieraus sin φ, B_{max} und μ berechnet.

E_μ	J_0	$\cos_\varphi$	$\sin_\varphi$	B_{max}	J_μ	H	μ
1	0.044	0.290	0.958	54.5	0.042	0.148	368
2	0.080	0.575	0.927	109	0.074	0.260	420
3	0.110	0.420	0.907	164	0.100	0.352	466
4	0.134	0.455	0.891	218	0.119	0.419	521
5	0.157	0.485	0.875	273	0.137	0.482	567
7	0.189	0.525	0.851	382	0.161	0.566	675
10	0.228	0.570	0.821	545	0.187	0.658	829
15	0.278	0.620	0.784	819	0.216	0.760	1078
20	0.320	0.645	0.764	1090	0.245	0.863	1260
30	0.394	0.670	0.743	1635	0.293	1.030	1590
40	0.458	0.680	0.733	2180	0.336	1.182	1840
50	0.512	0.690	0.723	2730	0.370	1.300	2100
60	0.567	0.695	0.719	3270	0.408	1.437	2280
70	0.618	0.700	0.714	3820	0.441	1.550	2460
80	0.665	0.700	0.714	4360	0.474	1.669	2610
90	0.712	0.700	0.714	4910	0.508	1.788	2760
100	0.760	0.700	0.714	5450	0.542	1.91	2850
110	0.810	0.690	0.723	6000	0.586	2.06	2910
120	0.870	0.680	0.733	6540	0.637	2.24	2920
130	0.934	0.670	0.743	7090	0.693	2.44	2900
140	1.018	0.645	0.764	7640	0.777	2.73	2800
150	1.114	0.620	0.784	8180	0.874	3.08	2650
160	1.210	0.595	0.804	8730	0.934	3.42	2550
170	1.312	0.555	0.839	9270	1.100	3.87	2390
180	1.442	0.520	0.854	9820	1.231	4.34	2260
190	1.606	0.490	0.872	10350	1.398	4.92	2100

μ und $\cos\varphi$ sind in Fig. 56 graphisch dargestellt als Funktion von B_{max}.

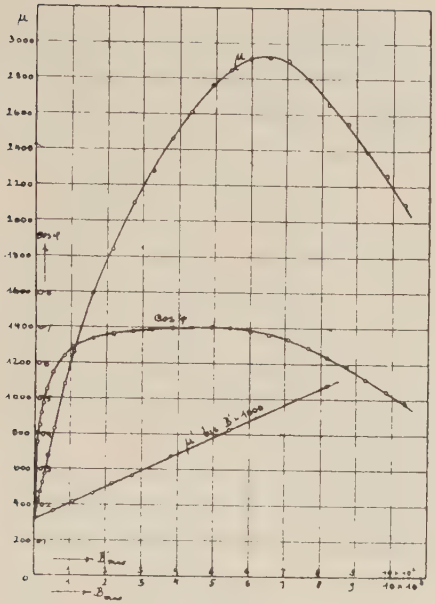


Fig. 56.

Trägt man den untersten Teil der μ = Kurve im 10fachen Maßstab von B_{max} auf (μ'), so ergibt sich eine Gerade. Der exterpolierte Wert von μ bei $B = 0$ ist $\mu_0 = 320$, entsprechend einer Gleichstrompermeabilität von $\frac{320}{\sqrt{2}} = 226$, unter Annahme der Sinusform.

Roeßler (E.T.Z. 1893, Seite 97 ff.) fand bei seinen Gleichstromuntersuchungen denselben charakteristischen Verlauf der μ = Kurve, von einem Anfangswert $\mu_0 = 250$ ausgehend. Die in Versuch α) und β) erhaltenen Werte von $\mu_{max} = 3500$ bezw. $\mu_{max} = 2900$ sind auffallend groß. Bei einem Hochspannungstransformator neuester Konstruktion von Koch und Sterzel wurde nach derselben Rechnungsart

$$\mu = \frac{B_{max}}{H_{eff}}$$

$\mu_{max} = 3600$ gefunden. Auch diese Maximalwerte sind, um mit den entsprechenden Gleichstrompermeabilitäten verglichen werden zu können noch mit $\frac{1}{\sqrt{2}}$ zu multiplizieren.

γ) Stromwandler von Siemens & Halske.

Dieser Stromwandler, der eine ältere, jetzt nicht mehr fabrizierte Type darstellt, hatte die bereits in Fig. 24 gezeichnete Form. Für

die Berechnung der Permeabilität usw. hat man sich diesen Transformator aus zwei parallel geschalteten Hälften vorzustellen. Der Querschnitt des mittleren Steges konnte nicht genau gemessen werden. Die Länge der Stoßfugen war von der Fabrik angegeben. Aus der Figur ergibt sich die mittlere Kraftlinienlänge zu

$$l_m = 35 \text{ cm}.$$

Gesamter Kraftlinienweg in Luft $0.5 + 0.1 = 0.6^{m}/_{m}$. Querschnitt des Luftspaltes $q_l = 2 \times 2.0 \times 1.9 = 7.6 \text{ cm}^2$. Der Eisenquerschnitt ist kleiner, da außer der Papierisolation (etwa 10%) noch der Raum für einen in der Mitte der Bleche liegenden Messingrahmen von $3\ ^{m}/_{m}$ Stärke abzuziehen ist. Es ergibt sich also

Eisenquerschnitt $q_e = 2 \times (2.0 - 0.3) \times 1.9 \times 0.9 = 5.8 \text{ cm}^2$

Mittlerer Querschnitt $q_m = 6.7 \text{ cm}^2$.

Für die Vorausberechnung von p und sin ψ wäre es hinreichend, die gemischte Permeabilität (Eisenkreis und Luftspalt zusammen) zu berechnen. Wegen des eigenartigen flachen Verlaufes dieser Kurve wurde aber μ für das Eisen noch besonders ermittelt.

E_μ konnte mit hinreichender Genauigkeit gleich der gemessenen Spannung E_1 gesetzt werden, weil der Winkel φ sehr groß war, sodaß die Ohmschen Spannungsabfälle nahezu senkrecht auf E_1 standen. (Siehe Fig. 53.) cos φ_c wurde richtig berechnet aus der um den Effektverbrauch des Ampèremeters, Wattmeters und der Kupferwicklung verminderten gemessenen Leistung.

Zur Ermittlung der Eisenpermeabilität wurde in folgender Weise verfahren: Aus E_μ wurde die Kraftlinienzahl N berechnet, aus dieser B_{max} für Luft und für das Eisen. Da μ für Luft bekannt = 1 ist, konnten die zur Überbrückung des Luftspaltes nötigen Ampèrewindungen berechnet werden. Durch Subtraktion dieser Zahl von der der gesamten Ampèrewindungen, erhielt man die zur Magnetisierung des Eisens nötigen A.W., woraus H und zuletzt $\mu = \frac{B_{max}}{H}$ für das Eisen berechnet wurden.

Die gemischte Permeabilität μ_g wurde unter Zugrundelegung eines mittleren Querschnittes q_m und demzufolge einer einheitlichen mittleren Induktion berechnet.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Versuchsergebnisse zusammengestellt.

($w_1 = 318$ Windungen; $\varrho_1 = 0.56\ \Omega$)

$E_1 = E_\mu$	J_0	σ_w	C_w	W	Σ_r	$J_0^2{}_r$	$W - J_0^2{}_r$	cos φ	sin φ	$J_0 \sin \varphi$	B_{max} gemischt	H	μ_g	Totale A. W.	B_{max} Luft	B_{max} Eisen	Luftspalt 0.6 m/m				Luftspalt 0.7 m/m			
																	AW Luft	AW Eisen	H Eisen	μ	AW Luft	AW Eisen	H Eisen	μ
1.08	0.075	—	—	—	2.73	—	—	—	—		228	0.85	268	23.8	197	263	9.45	14.35	0.516	510	11.0	12.8	0.461	570
1.51	0.100	—	—	—	,,	—	—	—	—		318	1.14	278	31.8	275	367	13.2	18.6	0.67	548	15.4	16.4	0.590	622
2.11	0.125	—	—	—	,,	—	—	—	—		445	1.42	313	39.8	385	514	18.5	21.3	0.766	620	21.6	18.2	0.655	785
2.57	0.150	—	—	—	,,	—	—	—	—		542	1.70	319	47.7	470	626	22.5	25.2	0.906	690	26.3	21.4	0.770	814
2.80	0.160	—	—	—	,,	—	—	—	—		591	1.82	324	50.9	512	683	24.6	26.3	0.947	722	28.7	22.2	0.798	856
3.27	0.178	0.4	0.5	0.2	,,	0.078	0.121	0.208	0.976		690	2.02	341	56.7	597	798	28.6	28.1	1.01	790	33.4	23.3	0.838	951
3.72	0.200	0 4	,,	0.2	,,	0.10	0.10	0.134	0.99		785	2.27	345	63.7	680	906	32.6	31.1	1.12	809	38.1	25.6	0.92	986
5.95	0.290	1.0	,,	0.5	,,	0.21	0.29	0.168	0.984		1260	3.30	382	92.3	1090	1460	52.3	40.0	1.44	1010	61.0	31.3	1.125	1300
6.85	0.330	1.35	,,	0.675	,,	0.30	0.375	0.166	0.986		1440	3.75	384	105.0	1248	1660	60.0	45.0	1.62	1024	70.0	35.0	1.26	1318
8.12	0.390	1.7	,,	0.85	,,	0.38	0.47	0.140	0.988		1710	4.44	385	124.2	1480	1980	71.0	53.2	1.91	1036	82.8	41 4	1.49	1328
9.45	0.440	2.3	,,	1.15	,,	0.52	0.63	0.152	0.989		1990	5.00	398	139.8	1720	2300	82.6	57.2	2.06	1116	96.3	43.5	1.566	1470
11.90	0.550	3.3	,,	1.65	,,	0.82	0.83	0.127	0.992		2510	6.25	402	175.0	2170	2900	104.0	71.0	2.55	1138	121.5	53.5	1.925	1506
10 30	0.479	2.2	,,	1.10	2.00	0.46	0.64	0.130	0.991		2170	5.45	398	152.3	1888	2510	90.3	62.0	2.23	1122	105.0	47.3	1.704	1470
12.0	0.535	3.1	,,	1.55	,,	0.63	0.92	0.136	0.990		2530	6.31	400	176.3	2190	2930	105.0	71.3	2.56	1140	123	53.3	1.92	1525
15.9	0.738	5.0	,,	2.5	,,	1.10	1.4	0.119	0.992		3360	8.40	400	235	2910	3880	139	96	3.46	1120	163	72	2 59	1490
17.5	0 810	6.1	,,	3.05	,,	1.30	1.75	0.123	0.992		3690	9.20	402	257	3190	4260	153	104	3.74	1140	178	79	2.84	1490
19.3	0.895	7.4	,,	3.7	,,	1.60	2.1	0.121	0.992		4070	10.2	399	281	3520	4700	169	115	4.14	1130	197	87	3.13	1500
21.1	0.980	8.8	,,	4.4	,,	1.92	2.48	0.120	0.992		4450	11.1	401	311	3850	5140	185	126	4.54	1130	216	95	3.42	1500
25.5	1.22	11.2	,,	5.6	1.47	2.05	3.55	0.114	0.993		5390	13.9	387	388	4660	6220	224	164	5.90	1050	261	127	4.62	1340
27.7	1.37	13.5	,,	6.75	,,	2.60	4.15	0.109	0.994		5850	15.6	375	436	5060	6760	243	193	6 95	965	283	153	5.51	1230
31.2	1.66	19.2	,,	9.6	,,	4.30	5.30	0.102	0.995		6590	18.9	348	528	5700	7610	273	255	9.20	830	319	209	7.54	1010
34.5	1.98	23.3	,,	11.65	,,	5.7	5.95	0.087	0.996		7290	22.5	323	630	6300	8410	302	322	11.6	725	353	277	10 0	841
37.3	2.38	29.7	,,	14.85	,,	8.3	6.55	0.074	0.997		7870	27.0	291	757	6810	9100	327	430	15.5	587	382	375	13.5	674
40.2	2.94	40.4	,,	20.20	,,	12.7	7.50	0.064	0.998		8490	33.4	254	935	7350	9800	352	583	21.0	466	412	523	18.8	520

Hinreichend genau ist $J_0 \sin \varphi = J_0$ zu setzen.

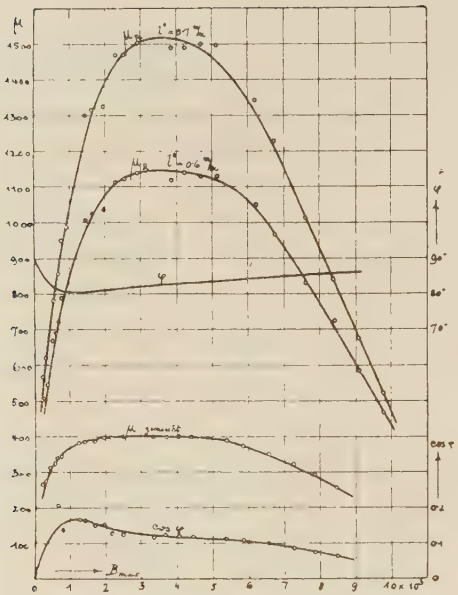


Fig. 57.

Die resultierende maximale Eisenpermeabilität ergibt sich unter Annahme einer Luftstrecke von $0.6^{m}/_{m}$ wie von der Fabrik angegeben, zu etwa 1140, also ziemlich klein. Rechnet man dagegen mit $0.7^{m}/_{m}$, so wächst μ bis auf 1520 und nähert sich auch die μ = Kurve mehr der normalen Form. Demnach dürfte der Luftspalt etwas größer sein als $0.6^{m}/_{m}$. Das Einfügen einer Luftstrecke hat also eine Verflachung der Permeabilitätskurve unter starker Herabsetzung ihres Maximalwertes zur Folge. φ ist durchweg zwischen 80° und 90°.

Die ganze Rechnung ist bei diesem Stromwandler unsicher. Kann schon der Eisenquerschnitt (im Innern der Spule) nicht genau ermittelt werden, so ist dies noch weniger bei der Ermittlung des Luftquerschnittes der Fall, weil sich ja die Kraftlinien in dem Luftspalt ausbreiten. Eine genaue Übereinstimmung der Theorie mit den Versuchsergebnissen wird man bei diesem Stromwandler nicht erwarten können.

b) Kurzschlußversuch.

Die gewöhnliche Schaltung zur Ausführung des Kurzschlußversuchs behufs Bestimmung von δ bezw. $L_{2\sigma}$ ist die folgende:

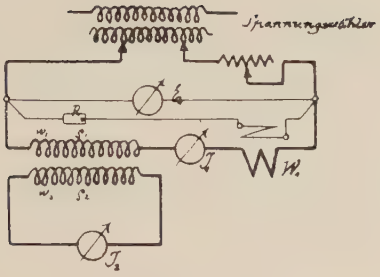


Fig. 58.

Der zu untersuchende Transformator wird als Stromwandler geschaltet und die Sekundärseite über ein Ampèremeter mit dem Widerstand r_2 kurzgeschlossen. Auf der Primärseite werden Strom, Spannung und Leistung gemessen. E_1 und W_1 sind gegebenenfalls unter Berücksichtigung des Widerstandes des Ampèremeters und der Stromspule des Wattmeters zu korrigieren, wie bereits für den Leerlaufversuch angegeben. Wird dagegen E_1 direkt an den Transformatorklemmen gemessen, so sind J_1 und W_1 in entsprechender Weise zu korrigieren. Aus diesen richtiggestellten Werten erhält man:

$$\cos \delta' = \frac{W_1}{E_1 J_1}$$

Damit läßt sich das Kurzschlußdiagramm konstruieren:

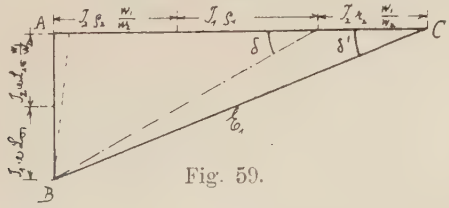


Fig. 59.

(Halbkreis über E_1, $\sphericalangle \delta'$ eintragen. Als Kontrolle muß

$$\overline{AC} = J_2 \varrho_2 \frac{w_1}{w_2} + J_1 \varrho_1 + J_2 r_2 \frac{W_1}{W_2} \text{ sein.)}$$

Durch Subtraktion der Strecke $J_2 r_2 \frac{W_1}{W_2}$ erhält man den Winkel δ für vollkommenen Kurzschluß ($r_2 = 0$).

Ist δ bekannt, so läßt sich der Selbstinduktionskoëffizient $L_{2\sigma}$ des Streufeldes oder $\omega L_{2\sigma}$ rechnen. Man setzt unter der Annahme daß die Streuungskoëffizienten beider Wicklungen gleich sind

$$J_1 \omega L_{1\sigma} = J_2 \omega L_{2\sigma} \frac{W_1}{W_2} = \frac{1}{2} \cdot \overline{AB} \text{ (Volt)}$$

$$\omega L_{1\sigma} = \frac{\overline{AB}\ (\text{Volt})}{2 J_1}$$

$$\omega\ L_{2\sigma} = J_1\ \omega\ L_{1\sigma}\ \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{1}{J_2} = \omega L_{1\sigma}\ \cdot\ \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

oder $\omega L_{2\sigma} = \omega\ L_{1\sigma} \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$

statt dessen kann man auch $\omega L_{2\sigma}$ direkt berechnen:

$$J_2\ \omega\ L_{2\sigma}\ \frac{w_1}{w_2} = \frac{1}{2}\ \overline{AB}\ (\text{Volt})$$

$$\omega\ L_{2\sigma} = \frac{\overline{AB}}{2 J_2} \cdot \frac{w_2}{w_1}$$

Kennt man $\omega L_{2\sigma}$, so läßt sich δ für jeden Belastungsfall rechnen

$$\operatorname{tg}\ \delta = \frac{\omega L_{2\sigma}}{r_2 + \varrho_2}$$

Ist die Streuung sehr groß, so kann es vorkommen, daß A B nicht mehr genau senkrecht zu A C steht, sondern den strichlierten Verlauf hat. In diesem Falle verlaufen die Streulinien nicht mehr ausschließlich in Luft, sondern auch in Eisen und verbrauchen deshalb Leistung.

Nach dieser Schaltung wurde der Stromwandler von Siemens und Halske untersucht. (Versuch 7.) Bei diesem ist δ sehr groß, etwa 70°. Ist aber die Streuung und damit auch δ klein, etwa unter 10°, so wird, wie schon kurz erwähnt, die Bestimmung von cos δ aus $\frac{W_1}{E_1 J_1}$ ungenau, namentlich wenn auch das Wattmeter nur kleine Ausschläge zeigt. Für diese Fälle wurde folgende Schaltung verwendet, die hier kurz beschrieben werden soll.

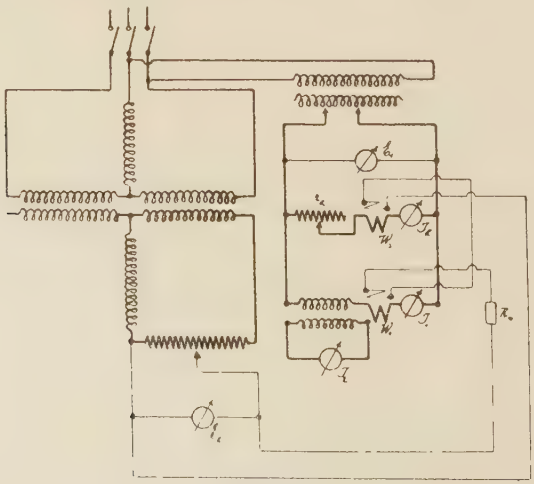


Fig. 60.

Zu messen ist der Winkel δ zwischen J_1 und E_1. An E_1 wird ein induktionsfreier Belastungswiderstand r_h gelegt, und an diesem der Hilfsstrom J_h so einreguliert, daß die Stromspule des Wattmeters W_2 voll belastet ist. An dem Stator des Phasentransformators wird mittels eines Spannungsteilers die Hilfsspannung E_h abgenommen so, daß die in Serie geschalteten Spannungsspulen beider Wattmeter die maximal zulässige Spannung erhalten. E_h wird nun durch Verdrehen des Rotors räumlich so verdreht, daß eines der beiden Wattmeter, z. B. W_1, auf Null zeigt, also E_h senkrecht zu J_1 steht.

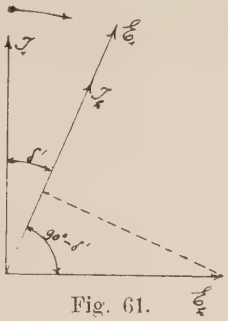


Fig. 61.

In diesem Fall zeigt das 2. Wattmeter W_2 an:

$$W_2 = E_h\ J_h \cos\ (90^0 - \delta')$$
$$= E_h\ J_h \sin \delta',$$

hieraus erhält man ohne weiteres δ'. Die Bestimmung von δ erfolgt ebenso wie bei dem erstgenannten Verfahren durch Subtraktion des Spannungsabfalles im Ampèremeter J_2.

Unter bestimmten ungünstigen Verhältnissen, namentlich dann, wenn die Instrumentenwiderstände in der Größenordnung des Transformatorwiderstandes oder gar noch größer sind, wird aber an dem gemessenen Winkel δ' die Anbringung einer Korrektur nötig. — Oben war nämlich gesagt, daß der Hilfsstrom J_h in Phase mit E_1 erhalten würde durch Verwendung eines induktionsfreien Belastungswiderstandes r_h. Selbst wenn aber r_h und auch das Ampèremeter J_h vollkommen induktionsfrei sind, so ist deswegen J_h noch nicht phasengleich mit E_1. Dies rührt von der Selbstinduktion der Wattmeterstromspule her. Diese beträgt bei den zu sämtlichen Messungen verwendeten direkt zeigenden Wattmetern von Siemens & Halske

für den Meßbereich 2.5 Amp. 1.23 Millihenry,
„ „ „ 5.0 „ 0.31 „

Bei z = 100 Wechseln ist ω L = 314 × 1.23 × 10^{-3} = 0.386 Ω_s bezw. 0.096 Ω_s für den großen Meßbereich. Der Ohmsche Widerstand der Stromspule ist für den kleinen Meßbereich 0.80 Ω, für den großen 0.20 Ω.

Würde man E_1 nur über ein solches Wattmeter kurzschließen, so wäre die entsprechende Phasenverschiebung zwischen E_1 und J_h gegeben durch:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{0.386}{0.80} = 0.483 = \frac{0.096}{0.20}$$

$$\beta = 25.7^0 \text{ für beide Meßbereiche.}$$

Nimmt aber der Belastungswiderstand r_h zu, so nimmt β rasch ab. Ist z. B. E_1 = 100 Volt und J_h = 2.5 Amp. entsprechend r_h = 40 Ω, so erhält man

$$\sin \beta = \frac{0.386}{40} = 0.0097$$

$$\beta = 33 \text{ Minuten.}$$

(Hier ist mit sin β zu rechnen, weil der aus E_1 und J_h gerechnete Wechselstromausgleichwiderstand r_h die Hypothenuse des Widerstandsdreieckes bildet.)

Die Anbringung der Korrektur geschieht in folgender Weise:

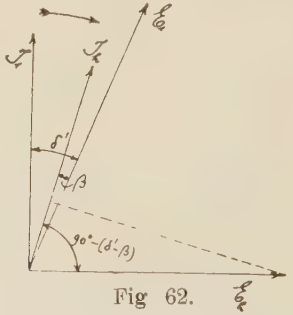


Fig 62.

Das Wattmeter W_2 zeigt an:

$$W_2 = E_h J_h \sin (\delta' - \beta) = E_h J_h \sin \delta''.$$

Man hat also zu dem erhaltenen Winkel δ'' noch β zu addieren, solange $\beta < \delta'$ ist. Ist β größer als δ', so hat man den gefundenen Winkel δ'' von β zu subtrahieren, um δ' zu erhalten.

Eine weitere Korrektur des gemessenen Winkels kann dadurch notwendig werden, daß auch hier, wie bei der Schaltung Fig. 53 E_1 um den Spannungsabfall in W_1 und J_1 zu groß gemessen wird.

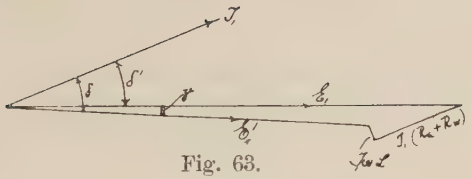


Fig. 63.

δ' wird um den Winkel γ zu klein erhalten. Man hat also den graphisch zu ermittelnden Winkel γ stets noch zu δ' zu addieren.

Bei kleinem δ erhält man E_1' einfacher aus

$$E_1' = E_1 - J_1 (R_A + R_W), \text{ wenn}$$

R_A und R_W die Ohmschen Widerstände des Ampèremeters und der Stromspule des Wattmeters sind.

Versuche.

a) Wechselspannungswähler $w_1 = w_2 = 20$

$\varrho_1 = 0.0188\ \Omega$ ($6^m/_{m^2}$) netto

$\varrho_2 = 0.0085\ \Omega$ ($12^m/_{m^2}$) netto

$R_W = 0.045\ \Omega$

$R_A = 0.104\ \Omega$ } $r_1 = 0.21\ \Omega$.

Zuleitung $= 0.06\ \Omega$

$r_2 = 0.092\ \Omega$ mit Zuleitung

$z = 100$ Wechsel

J_1	J_2	E_1	J_h	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	$\sin\delta''$	δ''	$R = \frac{E_1}{J_h}$	ωL	$\frac{\omega L}{R}$	β	$\delta'' + \beta$
5.29	4.73	1.77	3.33	94.0	2.4	15	36.0	0.116	6.6°	0.53	0.009	0.0017	1.0°	7.6°
4.95	4.42	1.64	4.16	„	3.1	„	46.5	0.120	6.9	0.39	„	0.0023	1.3	8.2
6.06	5.44	2.14	5.18	„	3.9	„	58.5	0.121	7.0	0.41	„	0.0022	1.3	8.3
6.44	5.76	2.17	4.03	„	3.2	„	48.0	0.128	7.4	0.54	„	0.0017	1.0	8.4
6.44	5.76	2.16	4.03	„	3.1	„	46.5	0.124	7.1	0.54	„	0.0017	1.0	8.1
5.49	4.94	1.15	2.03	„	1.7	„	25.5	0.135	7.7	0.91	„	0.0010	0.6	8.3
5.35	3.13	1.21	4.38	„	3.3	„	49.5	0.122	7.0	0.28	„	0.0032	1.9	8.9

Der Mittelwert von $\delta'' + \beta = 8.2°$. Die Bestimmung von δ ist hier sehr unsicher, weil der Widerstand der Ampèremeter etc. ein Vielfaches des Transformatorwiderstandes ist. Unter Berücksichtigung der auf voriger Seite angegebenen Widerstände kann δ durch Subtraktion des Spannungsabfalles $J_1 r_1$ und $J_2 r_2$ ermittelt werden z. B.

für den 2. Punkt, bei dem $\delta'' + \beta$ am besten mit dem Mittelwert übereinstimmt:

$$J_1 r_1 = 4.95 \times 0.21 = 1.01 \text{ Volt}$$
$$J_2 r_2 = 4.42 \times 0.092 = 0.41 \text{ ,,}$$
$$J_1 \varrho_1 = 4.95 \times 0.0188 = 0.093 \text{ ,,}$$
$$J_2 \varrho_2 = 4.42 \times 0.0085 = 0.038 \text{ ,,}$$

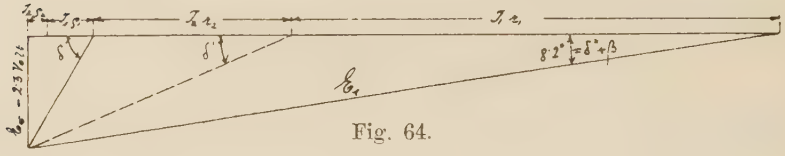


Fig. 64.

Daraus ergibt sich $\delta = 59^0$ für vollkommenen Kurzschluß. Aus der Zeichnung erhält man $E_1 = 1.58$ Volt, gemessen wurde 1.64 Volt, die Übereinstimmung ist also eine gute.

$$\omega L_{1\sigma} = \frac{2.3}{2} \times \frac{1}{4.95} = 0.232 \ \Omega_s$$

$$\omega L_{2\sigma} = \frac{2.3}{2} \times \frac{1}{4.42} = 0.262 \ \Omega_s.$$

b) Wechselspannungswähler $w_1 = w_2 = 200$

$\varrho_1 = 0.378\Omega$
$\varrho_2 = 0.387\Omega$
$r_1 = 0.21\Omega$
$r_2 = 0.092\Omega$ } wie beim letzten Versuch
$z = 100$ Wechsel.

J_1	J_2	E_1	J_h	E_h	α_{w_2}	C_{w2}	W_2	$\sin\delta''$	δ''	$R = \frac{E_1}{J_h}$	ωL	$\frac{\omega L}{R}$	β	$\delta'' + \beta$
1.19	1.13	1.30	13.3	94	1.8	15	27.0	0.022	1.3°	0.098	0.009	0.09	5.0°	6.3°
1.84	1.78	1.98	19.5	,,	3.8	,,	57.0	0.032	1.9	0.101	,,	0.09	5.0	6.9
2.00	1.97	2.19	4.09	,,	2.0	,,	30.0	0.079	4.5	0.537	,,	0.017	1.0	5.5
2.44	2.38	2.62	26.1	,,	4.1	,,	61.5	0.026	1.5	0.106	,,	0.09	5.0	6.5
3.33	3.28	3.59	4.27	,,	2.3	,,	34.5	0.087	5.0	0.84	,,	0.011	0.6	5.6
3.39	3.30	3.63	10.5	,,	5.2	,,	78.0	0.081	4.6	0.345	,,	0.026	1.5	6.1
5.38	5.29	5.92	4.71	,,	2.3	,,	34.5	0.079	4.5	1.48	,,	0.006	0.3	4.8
5.47	5.40	6.01	4.03	,,	2.0	,,	30.0	0.080	4.5	1.49	,,	0.006	0.3	4.8

Der Mittelwert von δ ist 5.8°. γ wird auch hier = Null gesetzt. Das Diagramm sei hier für den 5. Punkt ($J_1 = 3.33$ A) gezeichnet, bei dem $\delta' + \beta$ dem Mittelwert am nächsten kommt.

$J_1\, r_1 = 3.33 \times 0.21 = 0.70$ Volt
$J_2\, r_2 = 3.28 \times 0.092 = 0.30$ „
$J_1\, \varrho_1 = 3.33 \times 0.387 = 1.29$ „
$J_2\, \varrho_2 = 3.28 \times 0.378 = 1.24$ „

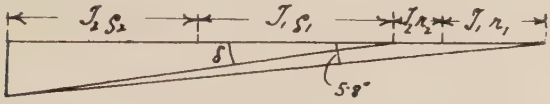


Fig. 65.

Der Winkel δ ergibt sich zu 7.8° für vollkommenen Kurzschluß.

$$\omega L_{1\sigma} = \frac{0.18}{3.33} = 0.054\ \Omega_s \doteq \omega L_{2\sigma}$$

$$\omega L_{2\sigma} = \frac{0.18}{3.28} = 0.055\ \Omega_s$$

c) Helios-Meßtransformator

$w_1 = 2000$ $\quad r_2 = 0.11\ \Omega$
$w_2 = 200$ $\quad z = 100$ Wechsel
$\varrho_1 = 85\ \Omega$ $\quad \omega L = 0.386 =$ konstant.
$\varrho_2 = 1.45\ \Omega$

J_1	J_2	E_1	J_h	E_h	α_{w2}	C_{w2}	W_2	$\sin \delta''$	δ''	$R = \frac{E_1}{J_h}$	$\frac{\omega L}{R}$	β	$\delta'' + \beta$
0.126	1.35	32.1	2.36	87.1	14.4	1.5	21.6	0.105	6.0°	13.6	0.028	1.6	7.6
0.166	1.66	40.5	2.76	85.6	16.4	„	24.6	0.104	6.0	14.7	0.027	1.6	7.6
0.215	2.12	52.1	2.91	86.1	17.1	„	25.7	0.103	5.9	17.9	0.0216	1.3	7.2
0.273	2.58	62.3	2.64	86.6	16.4	„	24.6	0.108	6.2	23.6	0.0163	1.0	7.2
0.303	3.00	73.4	2.63	86.6	16.2	„	24.3	0.107	6.1	27.9	0.0138	0.8	6.9
0.342	3.37	82.4	2.70	87.1	17.0	„	25.5	0.108	6.2	30.4	0.0127	0.7	6.9
0.388	3.79	94.0	2.53	87.1	15.5	„	23.3	0.106	6.1	34.8	0.0111	0.6	6.7
0.426	4.16	103.1	2.59	86.1	16.0	„	24.0	0.108	6.2	40.0	0.0096	0.6	6.8
0.464	4.55	112.8	2.59	86.1	16.3	„	24.5	0.110	6.3	43.5	0.0089	0.5	6.8
0.496	4.86	120.8	2.61	86.1	16.2	„	24.3	0.108	6.2	46.3	0.0083	0.5	6.7
0.531	5.18	129.8	2.60	86.1	15.7	„	23.6	0.106	6.1	50.0	0.0077	0.4	6.5
0.568	5.58	138.6	2.70	85.6	16.1	„	24.2	0.105	6.0	51.3	0.0075	0.4	6.5

Eine weitere Korrektur von $\delta'' + \beta$ ist nicht nötig. Der Spannungsabfall im Ampèremeter J_1 und im Wattmeter W_1 ist vernachlässigbar klein und damit auch die Phasenverschiebung γ.

Das so ermittelte $\delta' = \delta' + \beta$ scheint allerdings mit zunehmendem J_1 abzunehmen. Im nachfolgenden ist jedoch mit dem Mittelwert $\delta' = 7.0^0$ gerechnet.

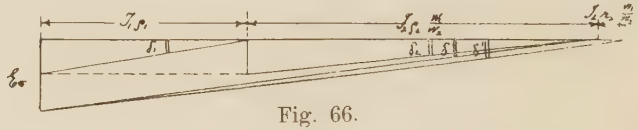


Fig. 66.

Durch Aufzeichnen des Diagrammes ergibt sich ferner, daß sich δ von δ' nur sehr wenig unterscheidet. Die Untersuchung ergab also

$$\delta = 7.0^0.$$

Die Streuung ist mithin sehr gering. Dies dürfte außer der konzentrischen Wicklung darin seine Ursache haben, daß der Eisenkörper aus ⌊-förmigen Blechen zusammengesteckt ist, also keine Stoßfuge hat.

Ermittlung von $\omega L_{2\sigma}$:

E_σ für die 5. Beobachtung ($\delta'' + \beta = 6 \,.\, 9^0$)

$$E_\sigma = \sin 7^0 \times E_1 = 0.122 \times 73.4 = 8.95 \text{ Volt}$$

$$\omega L_{1\sigma} = \frac{4.48}{0.303} = 14.8 \ \Omega_s$$

$$\omega L_{2\sigma} = \frac{0.448}{3.00} = 0.149 \ \Omega_s$$

d) Stromwandler von Siemens & Halske.

Infolge der großen Streuung ist bei diesem Stromwandler δ sehr groß, erheblich über 45°. Aus diesem Grunde wäre die Anwendung der vorhin verwendeten Methode zur Bestimmung von δ hier unangebracht. Es wurde deshalb die allgemein gebräuchliche Methode verwendet mit folgender Schaltung:

$W_1 = 200$

$W_2 = 318$

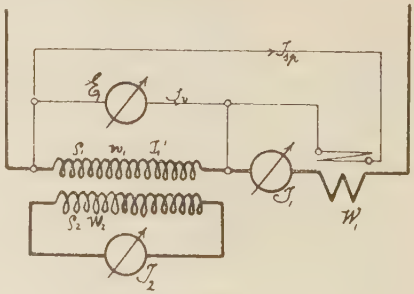


Fig. 67.

Bei dieser Schaltung ist J_1 zu groß gemessen, um den Strom im Voltmeter und in der Spannungsspule des Wattmeters. Dementsprechend ist auch W_1 zu groß gemessen.

Ist R_v der Widerstand des Voltmeters,

R_{sp} der Widerstand des Spannungsspulenkreises, so ist

J_1 zu vermindern um $\frac{E}{R_v} + \frac{E}{R_{sp}}$

W_1 „ „ „ $\frac{E^2}{R_v} + \frac{E^2}{R_{sp}}$

Die tatsächlichen Werte von J, E und zuletzt $\omega L_{2\sigma}$ erhält man durch die Konstruktion folgenden Diagrammes, das für jeden Punkt der nachstehenden Versuchsreihe gezeichnet wurde.

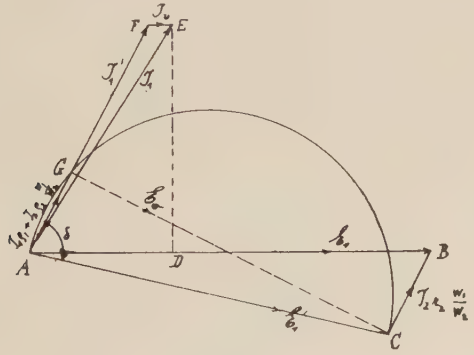


Fig. 68.

Mache $\overline{AB} = E_1$, $\overline{AD} = J_1 \cos\varphi = \frac{W_1}{E}$, DE senkrecht $\overline{AB}$, $\overline{AE} = J_1$. Hierauf trage $\overline{EF} = \left(\frac{E_1}{R_v} + \frac{E_1}{R_{sp}}\right)$ ein, gibt $J_1' = \overline{AF}$. Durch Subtraktion des Spannungsabfalles im Ampèremeter J_2 erhält man die eigentliche Kurzschlußspannung E_1'. Zu diesem Zweck mache man $\overline{BC} = J_2 r_2 \frac{W_1}{W_2}$ parallel J_1'. Durch Zeichnen des Halbkreises über $\overline{AC}$ erhält man den Punkt G, womit die gesamte, auf den Primärkreis reduzierte Streuspannung $E_\sigma = \overline{CG}$ bekannt ist. Zur Kontrolle muß $\overline{AG} = J_1 \varrho_1 + J_2 \varrho_2 \frac{W_1}{W_2}$ sein. Diese Bedingung wurde bei allen Diagrammen mit genügender Genauigkeit erfüllt.

J_1	J_2	α_w	C_w	W_1	E_1	$J_1 \cos\varphi$	J_v	$J_2 r_2 \frac{200}{318}$	δ	$E_{1\sigma}$	$\omega L_{1\sigma}$	r_2
0.776	0.421	1.2	0.5	0.60	1.53	0.392	0.065	0.360	75°	0.67	0.86	1.37
1.024	0.562	2.15	,,	1.08	2.05	0.529	0.088	0.480	76	0.91	0.89	1.37
1.36	0.76	2.7	,,	1.35	2.54	0.532	0.108	0.057	73	1.23	0.905	0.12
1.55	0.84	3.3	,,	1.65	2.86	0.578	0.122	0.063	74	1.36	0.88	,,
1.76	0.95	4.3	,,	2.15	3.21	0.671	0.136	0.072	73	1.52	0.87	,,
2.04	1.13	5.9	,,	2.95	3.74	0.79	0.159	0.085	73.5	1.77	0.87	,,
2.34	1.34	6.7	,,	3.35	4.35	0.77	0.025	0.101	72.5	2.06	0.88	,,
2.71	1.58	9.0	,,	4.50	5.1	0.88	0.029	0.119	73.5	2.42	0.90	,,
3.36	1.96	6.9	1.0	6.90	6.32	1.09	0.036	0.148	73.5	3.0	0.89	,,
4.02	2.32	9.7	,,	9.7	7.25	1.33	0.041	0.175	72.5	3.42	0.855	,,
4.60	2.68	12.7	,,	12.7	8.88	1.44	0.050	0.202	73.5	4.24	0.92	,,
4.99	2.94	14.9	,,	14.9	9.64	1.55	0.054	0.222	73.5	4.60	0.92	,,
5.54	3.26	18.3	,,	18.3	10.62	1.72	0.060	0.246	74	5.07	0.92	,,
6.12	3.58	22.1	,,	22.1	11.52	1.92	0.065	0.270	73.5	5.5	0.90	,,

Dabei war $R_v = 23.4\ \Omega$
$R_{sp} = 1000\ \Omega$
$\varrho_1 = 0.30\ \Omega$
$\varrho_2 = 0.56\ \Omega$
r_2 in der Tabelle angegeben.

Als Mittelwert von $\omega L_{1\sigma}$ erhält man $0.89\ \Omega_s$. Dementsprechend wäre $\omega L_{2\sigma} = \omega L_{1\sigma} \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2 = 0.89 \times \left(\frac{318}{200}\right)^2 = 2.25\ \Omega_s$. Bestimmt man aber $\omega L_{2\sigma}$ aus $E_{2\sigma}$ und J_2, so ergibt sich, weil J_2 kleiner ist, als es dem idealen Umsetzungsverhältnis entsprechen würde, $\omega L_{2\sigma} = 2.58\ \Omega_s$.

In der Folge ist mit dem Mittelwert gerechnet $\omega L_{2\sigma} = 2.42\ \Omega_s$.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2.42}{0.56} = 4.32$$

$\delta = 77°$ bei vollkommenem Kurzschluß.

V. Vergleich der experimentell aufgenommenen Werte von p und ψ mit den berechneten Werten.

Hiezu ist zu bemerken, daß ein einigermaßen genaues Übereinstimmen der theoretisch ermittelten Größe mit der gefundenen nur da erwartet werden kann, wo die zur Ableitung der Gleichungen gemachte Voraussetzung, daß p und ψ' klein sind, annähernd zutrifft. Aus diesem Grunde müssen die Versuche, die an dem Stromwandler mit $w_1 = w_2 = 20$ Windungen gemacht wurden oder mit abnorm großer Sekundärleistung durchgeführt wurden, hier ausscheiden. Doch bestätigen auch diese Versuche die Theorie insofern, als sich das Minimum von ν' tatsächlich bei kleinerer Induktion einstellt als das von p. Um Versuche zu kontrolieren, dürfte man nicht mehr die Gleichung anwenden, sondern man müßte für eine Anzahl Punkte das Transformatordiagramm konstruieren, von J_2 ausgehend, daraus J_1 und ν' ermittelnd. Für einen hier nicht wiedergegebenen Versuch wurde diese Konstruktion ausgeführt. Sie ergab völlige Übereinstimmung. Im nachfolgenden sei aber nur die Richtigkeit der abgeleiteten Gleichungen geprüft.

1. Stromwandler.

Um die Gleichung für p_i und $\sin \psi_i$ anwenden zu können, hat man zuerst δ und B_{max} zu ermitteln. Wie auf Seite 14 abgeleitet, ist

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L + \omega L_{2\sigma}}{r_2 + \varrho_2},$$

wenn L der Selbstinduktionskoëffizient der angeschlossenen Instrumente, r_2 ihr Widerstand ist.

B_{max} ergibt sich aus der Gleichung

$$B_{max} = \frac{r_2 + \varrho_2}{\cos \delta} \cdot \frac{10^8 \sqrt{2}}{\pi \, z \, q \, w_2} \cdot J_2$$

Zu B_{max} erhält man μ und $\cos \varphi$ aus den entsprechenden Kurven, womit man alle zur Berechnung von p_i und ν'_i nötigen Größen hat.

a) Versuch an dem Spannungswähler $w_1 = w_2 = 200$ (Seite 35, Fig. 22).

$r_2 = 2.17\ \Omega$

$\omega L = 0.386\ \Omega_s$ (Wattmeterstromspule, Meßbereich 2.5 A)

$\varrho_2 = 0.40\ \Omega$

$\omega L_{2\sigma} = 0.054\ \Omega_s$

$z = 100$

$l = 48$ cm

$q = 22.8$ cm² netto

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{0.386 + 0.054}{2.17 + 0.40} = \frac{0.44}{2.57} = 0.171$$

$\delta = 9.6^0$

$$B_{max} = \frac{r_2 + \varrho_2}{\cos\delta} \cdot \frac{10^8\sqrt{2}}{\pi\ z\ q\ w_2}\ J_2 = \frac{2.57 \times 10^8 \times \sqrt{2}}{0.99 \times 3.14 \times 100 \times 22.8 \times 200}$$

$B_{max} = 257\ J_2$

Für $J_2 = 2.0$ Amp.:

$B_{max} = 257.2 = 514$

hiezu nach Fig. 54 $\cos\varphi = 0.32$, $\mu = 780$

$\varphi = 71.3^0$

$$p_i = (\operatorname{cotg} 71.3^0 + \operatorname{tg} 9.6^0)\ \frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{l\ (r_2 + \varrho_2)}{q\ w_1\ w_1\ z} \cdot \frac{1}{\mu}$$

$$= (0.338 + 0.171)\ \frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{48 \times 2.57}{22 \cdot 8 \times 200 \times 200 \times 100} \cdot \frac{1}{780}$$

$p_i = 0.509 \times 0.062 = 0.032$

$\sin\psi_i = (1 - \operatorname{cotg}\varphi \operatorname{tg}\delta)\ 0.062$

$= (1 - 0.338 \times 0.171)\ 0.062 = 0.0585$

$\psi_i = 3.3^0$.

Der Versuch ergab: $p_i = 0.041$

$\psi_i = 3.0^0$.

Führt man die Rechnung noch für einige Punkte durch, so ergibt sich:

J_2	berechnet		Versuch	
	p_i	ψ_i	p_i	ψ_i
1.5	0.035	4°	0.046	3.5°
2.0	0.032	3.3°	0.041	3.0°
2.5	0.031	2.9°	0.038	2.6°
3.0	0.029	2.6°	0.035	2.3°

Wie ersichtlich, stimmen die Versuchsergebnisse ganz gut mit den errechneten Werten überein. Die geringen Abweichungen dürften darin begründet sein, daß bei den geringen Induktionen ($B_{max} = 386$ bei $J_2 = 1.5$ Amp.) sowohl μ als vor allem $\cos \varphi$ nicht mehr genau zu bestimmen sind, wenn nicht die Abweichungen bei p_i zum Teil auch davon herrühren, daß die Windungszahlen nicht genau gleich sind, wie angenommen wurde. ψ_i wurde genauer berechnet; dies rührt davon her, daß der Faktor $(1 - \text{cotg } \varphi \text{ tg } \delta)$ sehr nahe $= 1$ ist, also eine Ungenauigkeit in der Ermittlung von φ oder δ nicht sehr ins Gewicht fällt, während dies bei dem Faktor $(\text{cotg } \varphi + \text{tg } \delta)$, der bei p_i steht, bedeutenden Einfluß auf das Endresultat hat.

b) Stromwandler von Siemens & Halske.

Versuch Seite 36 (Fig. 23).

$r_2 = 2.17\ \Omega$

$\omega L = 0.386\ \Omega_s$

$\varrho_2 = 0.56\ \Omega$; $r_2 + \varrho_2 = 2.73\ \Omega$

$\omega L_{2\sigma} = 2.42\ \Omega_s$; $\omega L_{2\sigma} + \omega L = 2.81\ \Omega_s$

$z = 100$

$l = 35$ cm

$q = 6.7$ cm^2

$w_1 = 200$

$w_2 = 318$

$$\text{tg } \delta = \frac{\omega L + \omega L_{2\sigma}}{r_2 + \varrho_2} = \frac{2.81}{2.73} = 1.03$$

$\delta = 46^0$, $\cos \delta = 0.695$

$$B_{max} = \frac{r_2 + \varrho_2}{\cos \delta} \cdot \frac{10^8 \sqrt{2}}{\pi\, z\, q\, w_2} \cdot J_2 = 830\ J_2.$$

Für $J_2 = 2.0$ Amp.

$B_{max} = 1660$, aus Fig. 57:

$\mu_g = 390$

$\cos \varphi = 0.156$, $\text{cotg } \varphi = 0.158$

$$p_i = (\text{cotg } \varphi + \text{tg } \delta) \frac{10^9 \sqrt{2}}{4 \pi^2} \cdot \frac{35 \cdot 2.73}{318 \times 318 \times 6.7 \times 100} \cdot \frac{1}{\mu}$$

$p_i = 1.19 \times 0.13 = 0.154$

$\sin \psi_i = (1 - \text{cotg } \varphi \text{ tg } \delta) \times 0.13 =$

$(1 - 0.173) \times 0.13 = 0.109$

$\psi_i = 6.2^0$

Mit Einschluß dieses Punktes ergibt sich für $r_2 = 2.17\ \Omega$ folgende Zusammenstellung:

J_2	berechnet		Versuch	
	p_i	ψ_i	p_i	ψ_i
0.5	0.194	8.5°	0.146	7.6°
1.0	0.169	6.8°	0.135	7.3°
1.5	0.159	6.3°	0.127	7.1°
2.0	0.154	6.2°	0.122	6.9°
3.0	0.148	6.2°	0.114	6.5°

Desgleichen für $r_2 = 0.98\ \Omega$ (Fig. 25):

J_2	berechnet		Versuch	
	p_i	ψ_i	p_i	ψ_i
0.5	0.196	4.8°	0.194	5.0°
1.0	0.165	3.5°	0.137	3.7°
1.5	0.154	3.0°	0.114	3.6°
2.0	0.150	3.0°	0.103	3.6°
3.0	0.140	3.0°	0.094	3.6°

Ferner für $r_2 = 0.38\ \Omega$ (Fig. 25):

J_2	berechnet		Versuch	
	p_i	ψ_i	p_i	ψ_i
0.5	0.169	2.6°	0.156	3.3°
1.0	0.148	1.9°	0.109	2.0°
1.5	0.138	1.7°	0.088	2.0°
2.0	0.132	1.5°	0.078	2.0°
3.0	0.125	1.6°	0.070	2.0°

Diese Versuche stimmen mit den gerechneten Zahlen, wie ersichtlich, nicht so gut zusammen wie der vorhergehende. Beim kleinsten r_2, also bei den kleinsten Werten von B_{max} weichen die Resultate am meisten voneinander ab. Dies deutet auch bei diesem Stromwandler darauf hin, daß die $\mu =$ und cos $\varphi =$ Kurve in ihrem untersten Teil nicht genau genug ermittelt sind. Diese wären eventuell dadurch genauer zu ermitteln, daß man von den Resultaten vorliegender Arbeit Gebrauch macht und Strom oder Spannung oder auch beide so transformiert, daß die verwendeten Meßinstrumente (vor allem das Wattmeter) einen genügend großen Ausschlag geben. Durch Berücksichtigung der anzubringenden Korrekturen ermittelt man dann die ursprünglichen Größen.

Der interessante Fall, daß ψ_1 dadurch zu Null und negativ wird, daß $\varphi \leqq \delta$ ist, konnte nicht experimentell bestätigt werden.*)

Auf der dem Verfasser von der Firma Koch & Sterzel zur Verfügung gestellten, schon früher erwähnten Abschrift eines Prüfungsscheines der Physikalisch-technischen Reichsanstalt trat aber dieser Fall bei dem dort untersuchten Stromwandler ein. Der Richtungssinn von ψ_1 war in dem Prüfschein in der gleichen Weise festgesetzt, wie in der vorliegenden Arbeit. Allerdings liegen nur wenige Punkte vor, aber für unsere Zwecke sind diese bereits hinreichend. Die betr. Prüfungsergebnisse lauten unter Vertauschung des dort gebrauchten Zeichens δ mit ψ_1:

Phasenverschiebung zwischen J_1 und J_2

Meßbereich	Primäre Stromstärke	Sekundäre Belastung		
		0.1 Ω	0.3 Ω	1.0 Ω
1000 : 5 A	200 A	—	+ 16 Min.	+ 20 Min.
,,	600 ,,	— 2.0 Min.	— 0.7 ,,	+ 6.2 ,,
,,	1000 ,,	— 2.2 ,,	— 1.8 ,,	+ 3.2 ,,

*) Anmerkung. Nach Abschluß dieser Arbeit gelang dies noch an einer Anordnung bei der Primär- und Sekundärspule ($w_1 = w_2 = 300$) auf 2 Schenkeln des Eisengestelles eines Wechselspannungswählers saßen. Es war $\delta = 80°$; bei $r_2 = 0.3\ \Omega$ und $J_2 = 5.0$ A betrug $\psi_1 = -30$ Min. $p_1 = 0.05$.

Trägt man diese Punkte, so gut es geht, graphisch auf, so ergibt sich Fig. 69.

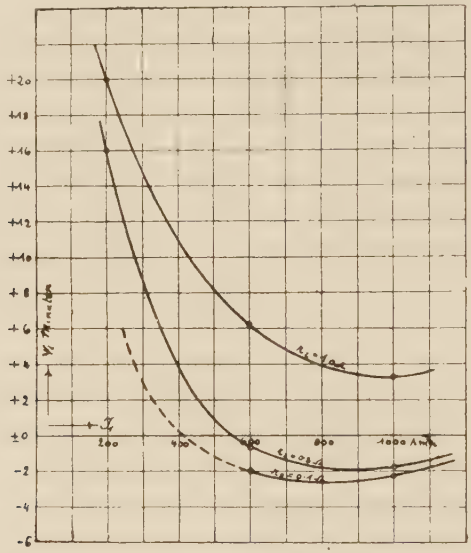


Fig. 69

Mit zunehmender Sekundärbelastung r_2 vermindert sich δ nach der Formel $\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L_{2\sigma}}{r_2 + \varrho_2}$, bis δ schließlich bei 1.0 Ω durchweg kleiner als φ ist. Charakteristisch ist auch das rasche Anwachsen von w_i bei abnehmendem Strom, wie es auch in Fig. 8 zu ersehen ist für großes δ.

Die Stromwandler der Firma Siemens & Halske verhalten sich anders, wie aus einer Druckschrift zu entnehmen ist. Die Reichsanstalt fand nämlich für einen Präzisionsstromwandler mit den Meßbereichen 600 : 5 und 1200: 5 Amp. folgende Phasenverschiebungen*):

Meßbereich	Primäre Stromstärke	Sekundäre Belastung	
		0.1 Ω	0.6 Ω
600 : 5	120 Amp.	23 Min.	34 Min.
..	360 „	11 „	18 „
„	600 „	7 „	12 „

*) Anmerkung: Die neuesten Ausführungen von Stromwandlern dieser Firma haben laut Attest der Reichsanstalt kleinere, gleichfalls null und negativ werdende Phasenverschiebungen.

Zum Vergleich sind auch diese Ergebnisse in Fig. 70 graphisch dargestellt.

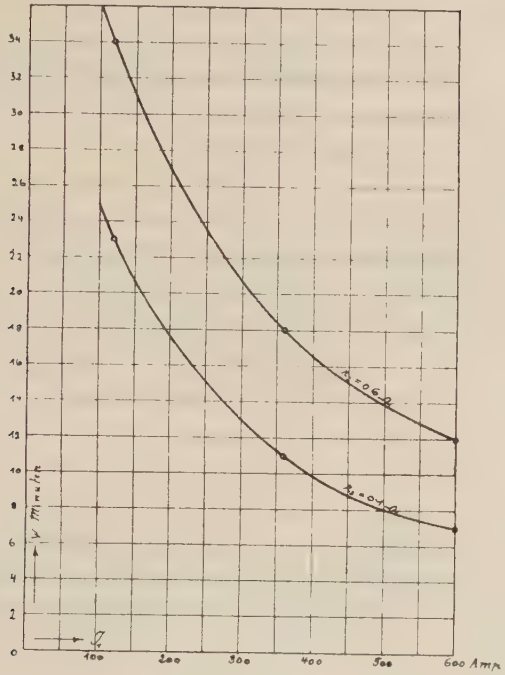


Fig. 70.

2. Spannungswandler.

Auch hier sollen die an dem Spannungswähler und an dem Meßtransformator gemachten Versuche rechnerisch nachgeprüft werden.

a) Spannungswähler $w_1 = w_2 = 80$ (Fig. 30):

$r_2 = 1000\ \Omega$ bezw. $= 2000\ \Omega$ von 40 Volt ab

$\varrho_1 = \varrho_2 = 0.23\ \Omega$

$l = 48$ cm

$q = 22.8$ cm² netto

$z = 100$ Wechsel

$\delta = 30^0$ (nach der allgemein üblichen Methode, ohne Phasentransformator gemessen.)

$$p_c = \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_1}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right] + (\operatorname{cotg}\ \varphi + \operatorname{tg}\ \delta)\ \frac{10^9 V\overline{2}}{4\pi^2} \cdot \frac{l}{q} \cdot \frac{\varrho_1}{w_1^2\ z\ \mu}$$

$$p_e = \left[\frac{0.23}{1000} + \frac{0.23}{1000}\right] + (\cot g\,\varphi + \operatorname{tg} 30^0)\,\frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2}\cdot\frac{48}{22.8}\cdot\frac{0.23}{80^2\,.\,100}\cdot\frac{1}{\mu}$$

$$p_e = 0.00046 + (\cot g\,\varphi + \operatorname{tg} 30^0)\,\frac{27.1}{\mu}$$

$$\sin\psi'_e = -\left[\frac{\varrho_2}{r_2} - \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\right]\operatorname{tg}\delta + (1 - \cot g\,\varphi\,\operatorname{tg}\delta)\,\frac{27.1}{\mu} \quad \text{oder}$$

$$\sin\psi'_e = -0.00046\,\operatorname{tg} 30^0 + (1 - \cot g\,\varphi\,\operatorname{tg} 30^0)\,\frac{27.1}{\mu}$$

B_{max} berechnet sich aus

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}}\,z\,B_{max}\,q\,w\,10^{-8};\ \text{hieraus}$$

$$B_{max} = \frac{10^8\sqrt{2}}{\pi\,z\,q\,w_2}\,E = \frac{10^8\sqrt{2}}{\pi\,100\times 22.8\times 80} = 246\ E.$$

E	B_{max}	μ	cos φ	cotg φ	cotg φ + tg δ	cotg φ tg δ	1 — cotg φ tg δ	p'_e	sin ψ'_e	ψ'_e	ψ_e	gemessen ψ_e
5	1230	1380	0.470	0.532	1.109	0.307	0.693	0.0218	0.0136	48	47	—
10	2460	2300	0.570	0.693	1.270	0.394	0.604	0.0150	0.00711	25	24	18.5
15	3690	2940	0.615	0.781	1.358	0.451	0.549	0.0125	0.00505	17.5	16.5	14
20	4920	3350	0.626	0.803	1.380	0.462	0.538	0.0112	0.00435	15.0	14.0	14
25	6150	3470	0.610	0.771	1.348	0.445	0.555	0.0106	0.00434	15.0	14.0	15
30	7380	3420	0.575	0.702	1.279	0.405	0.595	0.0101	0.00471	16.0	15.0	16.5
35	8620	3200	0.515	0.601	1.178	0.346	0.654	0.0100	0.00553	19	18.0	18.5
40	9850	2830	0.446	0.499	1.076	0.288	0.712	0.0103	0.00682	29.5	22.5	21.5
45	10700	2500	0.395	0.430	1.007	0.248	0.752	0.0109	0.00815	28.0	27.5	25.5
50	12300	1720	0.290	0.302	0.879	0.174	0.826	0.0138	0.0130	46	45.5	32.0

Mit p'_e bezw. ψ'_e sind in dieser Tabelle p_e und ψ_e für $r_2 = \infty$ bezeichnet. Im vorliegenden Fall ist p_e — p'_e (Fehler 0.046 % absolut).

Für $r_2 = 1000\ \Omega$ ist sin ψ'_e zu berechnen:

$+ \sin\psi'_e - 0.00046 \times \operatorname{tg} 30^0 = + \sin\psi'_e - 0.000265 =$
$= + \sin\psi'_e - \sin 1'$. Von ψ'_e ist also für $r_2 = 1000\ \Omega$ 1 Minute zu subtrahieren, für $r_2 = 2000\ \Omega$ 0.5 Min. Abgesehen von den höchsten und niedersten B-Werten ist hier die Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den berechneten recht gut zu nennen. Die Kurve der berechneten Werte von ψ_e ist in die der aufgenommenen Werte strichliert eingezeichnet, ferner ist noch p_e eingetragen. (Siehe Fig. 30.)

b) Helios-Meßtransformator:

$\varrho_1 = 85.2\ \Omega$

$\varrho_2 = 1.45\ \Omega$

$\delta = 7^0$; $\operatorname{tg}\delta = 0.123$

$w_1 = 2000$

$w_2 = 200$

$l = 71$ cm

$q = 41.4$ cm$_2$ netto.

$$p_e = \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2\right] + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\,\frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2}\cdot\frac{l}{q}\cdot\frac{\varrho_1}{W_1^2\, z\,\mu}$$

$$= \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\cdot\frac{1}{100}\right] + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\frac{1\ ^9\sqrt{2}}{4\pi^2}\cdot\frac{71\times 85\,2}{41.4\times 2000^2\times 100}\cdot\frac{1}{\mu}$$

$$= \left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\cdot\frac{1}{100}\right] + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13\,1}{\mu}$$

$$\sin\psi_e = -\left[\frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_2}\cdot\frac{1}{100}\right]\operatorname{tg}\delta + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

1.) $r_2 = 730\ \Omega$

$$p_e = \left[\frac{1\,45}{730} + \frac{85.2}{730}\cdot\frac{1}{100}\right] + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$= 0.00314 + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$\sin\psi_e = -(0.00314)\times 0.123 + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$= -0.000386 + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$= -\sin 1.3\,\text{Min.} + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

2.) $r_2 = 616\ \Omega$; in gleicher Weise

$$p_e = 0.00374 + (\operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$\sin\psi_e = -0.000460 + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$= -\sin 1.6\ \text{Min.} + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

3.) $r_2 = 470\ \Omega$

$$p_e = 0.00490 + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$\sin\psi_e = -0.000603 + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

$$= -\sin 2.1\ \text{Min.} + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\ \operatorname{tg}\delta)\,\frac{13.1}{\mu}$$

4.) $r_2 = 150.6\ \Omega$

$$p_e = 0.01529 + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta)\frac{13.1}{\mu}$$

$$\sin\psi_e = -0.00188 + (1 - \operatorname{cotg}\varphi \operatorname{tg}\delta)\frac{13.1}{\mu}$$

$$= -\sin 6.5\,\text{Min.} + (1 - \operatorname{cotg}\varphi \operatorname{tg}\delta)\frac{13.1}{\mu}$$

Weiterhin ist: $B_{max} = \frac{10^8\sqrt{2}}{\pi\, z\, w_2\, q} E = \frac{10^8\sqrt{2}}{\pi\, 100 \times 200 \times 41.4}$

$$B_{max} = 54.3\ E.$$

In der nachfolgenden Tabelle sind zunächst p'_e und ψ'_e für $r_2 = \infty$ berechnet. Erst hieraus sind in den weiteren Tabellen p_e und ψ_e für endliches r_2 bestimmt und ψ_e mit den experimentell ermittelten Werten (Fig. 31 u. 32) verglichen.

E_{2k}	B_{max}	μ	$\cos\varphi$	$\operatorname{cotg}\varphi$	$\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta$	$\operatorname{cotg}\varphi \operatorname{tg}\delta$	$1 - \ldots$	p'_e	$\sin\psi'_e$	ψ'_e
10	543	820	0.575	0.703	0.825	0.0866	0.913	0.0132	0.0146	51
20	1086	1260	0.643	0.839	0.962	0.103	0.897	0.0100	0.0093	32
30	1630	1600	0.670	0.900	1.023	0.111	0.889	0.0084	0.00727	25
40	2170	1850	0.680	0.927	1.050	0.114	0.886	0.0074	0.00628	22
50	2720	2080	0.690	0.954	1.077	0.117	0.883	0.0068	0.00556	19
70	3800	2460	0.700	0.982	1.105	0.121	0.879	0.0059	0.00461	16
90	4900	2760	0.702	0.987	1.110	0.121	0.879	0.0053	0.00417	14.5
110	5970	2910	0.695	0.966	1.089	0.119	0.881	0.0049	0.00397	14
130	7060	2900	0.670	0.900	1.023	0.111	0.889	0.0046	0.00402	14
150	8150	2680	0.625	0.800	0.923	0.0985	0.901	0.0045	0.00440	15
170	9230	2400	0.562	0.679	0.802	0.0825	0.917	0.0045	0.00501	17

1. Versuchsreihe ($r_2 = 730 \div 470\ \Omega$, Fig. 31).

E_{2k}	p_e	r_2	$\sin \psi_e$	ψ_e	gemessen ψ_e
10	0.0181	470 Ω	0.0140	49 Min.	42 Min.
20	0.0149	,,	0.0087	30 ,,	25 ,,
30	0.0133	,,	0.00667	23 ,,	19 ,,
40	0.0111	616 Ω	0.00582	20 ,,	15 ,,
50	0.0099	730 Ω	0.00517	18 ,,	12 ,,
70	0.0090	,,	0.00429	15 ,,	19 ,,
90	0.0084	,,	0.00378	13 ,,	7 ,,
110	0.0080	,,	0.00358	12.5 ,,	6 ,,
130	0.0077	,,	0.00363	12.5 ,,	—
150	0.0076	,,	0.00401	14 ,,	—
170	0.0076	,,	0.00462	16 ,,	—

2. Versuchsreihe ($r_2 = 150.6\ \Omega$, Fig. 32).

E_{2k}	p_e	r_2	$\sin \psi_e$	ψ_e	gemessen ψ_e
10	0.0285	150.6 Ω	0.01273	46 Min.	40 Min.
20	0.0253	,,	0.00742	26 ,,	21 ,,
30	0.0237	,,	0.00539	19 ,,	14 ,,
40	0.0227	,,	0.00444	15 ,,	10 ,,
50	0.0221	,,	0.00368	13 ,,	7 ,,
70	0.0212	,,	0.00288	10 ,,	5 ,,
90	0.0206	,,	0.00227	8 ,,	0 ,,
110	0.0202	,,	0.00209	7 ,,	—2 ,,
130	0.0199	,,	0.00214	7 ,,	—3 ,,
150	0.0198	,,	0.00252	9 ,,	—
170	0.0198	,,	0.00313	11 ,,	—

Diese rechnerisch ermittelten Werte sind in Fig. 31 und 32 zu den experimentell gefundenen strichliert eingetragen. Vergleicht man sie mit den Versuchsresultaten, so findet man, daß im Gegensatz zu den

Versuchen an Stromwandlern hier p_e besser stimmt als ψ_e. Die aufgenommenen Werte von p_e lassen sich ganz gut durch die theoretisch ermittelten Werte ersetzen. ψ'_e stimmt weniger genau. Dies hat seinen Grund wahrscheinlich in dem ungenau ermittelten Winkel δ. Auf Seite 82 wurde ja bereits die Vermutung ausgesprochen, daß δ mit der Belastung abnimmt. Nachfolgend ist die Rechnung für $r_2 = 150.6\ \Omega$ und $\delta = 9^0$ durchgeführt, die damit erhaltenen Werte sind für p_e sehr genau dieselben wie zuerst (bei $\delta = 7^0$), bei ψ'_e tritt aber eine größere Annäherung an das Versuchsresultat ein. (Punktierte Kurve.)

$\delta = 9^0$; $\operatorname{tg} \delta = 0.158$.

E	$\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta$	$\operatorname{cotg}\varphi \operatorname{tg}\delta$	1 — ...	p'_e	$\sin \psi'_e$	$\sin \psi_e$	ψ_e	p_e
10	0.861	0.111	0.889	0.0138	0.0142	0.0118	31 Min.	0.0291
20	0.997	0.132	0.868	0.0104	0.0090	0.0066	23 ,,	0.0257
30	1.058	0.142	0.858	0.0087	0.0070	0.0046	16 ,,	0.0240
40	1.085	0.146	0.854	0.0077	0.0060	0.0036	12.5 ,,	0.0230
50	1.112	0.151	0.849	0.0070	0.00545	0.0030	10.5 ,,	0.0223
70	1.140	0.155	0.845	0.0061	0.0045	0.0021	7.0 ,,	0.0214
90	1.145	0.156	0.844	0.0054	0.0040	0.0016	5.5 ,,	0.0207
110	1.124	0.152	0.848	0.0051	0.0038	0.0014	5.0 ,,	0.0204
130	1.058	0.142	0.858	0.0048	0.0039	0.0015	5.0 ,,	0.0201
150	0.958	0.126	0.874	0.0047	0.0043	0.0019	6.5 ,,	0.0200
170	0.837	0.107	0.893	0.0046	0.0049	0.0025	8.5 ,,	0.0199

Außerdem dürfte die Abweichung zum Teil noch darin begründet liegen, daß mit einem mittleren Streuwinkel δ gerechnet wurde, während ja doch Primär- und Sekundärkreis selbst unter Annahme gleicher Streuungskoeffizienten verschiedene Winkel δ aufweisen, falls nicht ihre Widerstände sich genau wie die Quadrate der Windungszahlen verhalten. Bei dem untersuchten Transformator traf dies nicht zu ($\varrho_1 = 85\ \Omega$, $\varrho_2 = 1.45\ \Omega$, $\frac{\varrho_1}{\varrho_2} = 58.6$ statt 100). Aus dem Dreieck Fig. 66 ergibt sich

$\delta_1 = 9.8^0$

$\delta_2 = 5.8^0$

Die genauen Formeln müßten demnach lauten:

$$p_e = \frac{\varrho_2}{r_2} + \frac{\varrho_1}{r_1}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 + (\operatorname{cotg}\varphi + \operatorname{tg}\delta_1)\,\frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2}\cdot\frac{l}{q}\cdot\frac{\varrho_1}{w_1^2 z}\cdot\frac{1}{\mu}$$

$$\sin\psi_e = -\frac{\varrho_2}{r_2}\operatorname{tg}\delta_2 - \frac{\varrho_1}{r_1}\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\operatorname{tg}\delta_1 + (1 - \operatorname{cotg}\varphi\operatorname{tg}\delta_1)\frac{10^9\sqrt{2}}{4\pi^2}\cdot\frac{l}{q}\cdot\frac{\varrho_1}{w_1^2 z}\cdot\frac{1}{\mu}$$

Wenn auch mit dieser Formulierung noch keine ganz genaue Übereinstimmung der Versuche mit den berechneten Werten vorhanden ist, so ist doch unzweifelhaft zu erkennen, daß die in Fig. 17 beschriebene Verschiebung der Abscissenachse sowohl für p_e als auch ψ_e in der theoretisch ermittelten Weise eintrat. Allerdings wurde ψ_e schon bei einer kleineren Sekundärbelastung zu Null und negativ. Der Grund liegt — wie schon erwähnt — wohl hauptsächlich daran, daß der Streuwinkel δ nicht konstant, sondern eine Funktion des Sekundärstromes ist, δ ist also variabel. Diese Änderung zahlenmäßig weiter zu untersuchen, würde für die Theorie der Meßtransformatoren wenig Nutzen bringen und die abgeleiteten Formeln unübersichtlich machen.*

* Anmerkung. Von Herrn Prof. Heinke wurde ich darauf aufmerksam gemacht, daß der wahre Grund des Nichtübereinstimmens der errechneten Werte mit den beobachteten zum größten Teil darin liegen dürfte, daß die benützten bifilar gewickelten Vorschaltwiderstände der Wattmeterspannungsspulen nicht, wie auf Seite 44 vorausgesetzt wurde, nur Ohmschen Widerstand, sondern noch resultierende Kapazität aufweisen. Dadurch wird bei Messung hoher Spannungen die Selbstinduktion der beweglichen Spule nicht nur kompensiert, sondern es wird sogar der ganze Spannungsspulenkreis resultierende Kapazität haben und J_{sp} der Spannung E voreilen.

Leider konnte der Verfasser wegen Semesterschluß keine Versuche mehr in dieser Richtung vornehmen.

VI. Folgerungen für die Konstruktion.

Bevor in die eigentliche Erörterung dieser Frage eingetreten wird, seien noch die Anforderungen besprochen, die von einem guten Meßtransformator, der keiner Zusammeneichung mit den Instrumenten bedarf, erfüllt werden sollen. Als solche sind aufzustellen:

1. Das Verhältnis $E_1 : E_2$ bezw. $J_1 : J_2$ soll praktisch konstant sein, auch für den Fall, daß der Widerstand der sekundär angeschlossenen Apparate innerhalb einer gewissen, für den betreffenden Typus festzusetzenden Grenze, variiert wird.

2. Die von der Phasenverschiebung zwischen E_1 und $-E_2$ bezw. J_1 und $-J_2$ herrührende Korrektion der Leistungsmessung soll für einen bestimmten Leistungsfaktor einen festzusetzenden prozentualen Betrag nicht überschreiten.

Handelt es sich um Meßtransformatoren, die nur in Verbindung mit Strom- bezw. Spannungszeigern, nicht aber mit Leistungszeigern gebraucht werden sollen, so fällt Punkt 2. weg, was dann die Erfüllung von Punkt 1. leichter gestalten kann.

Bezüglich des Fehlers am Umsetzungsverhältnis p kann z. B. verlangt werden, daß es, solange die Sekundärbelastung unterhalb der von der Fabrik für die betr. Type festgesetzten Maximalbelastung bleibt, den Wert von + 0.5 % nicht überschreiten darf zwischen z. B. $\frac{1}{5}$ Normalstrom und Normalstrom.

Während p unabhängig vom Leistungsfaktor ist, ist dies bei der von α'' herrührenden Wattmeterkorrektur nicht der Fall, sondern die Korrektion nimmt — nach der Annäherungsformel — proportional der Tangente des Phasenverschiebungswinkels zwischen Strom und Spannung zu. Um die zulässige Größe von α'' festzulegen, geht man von einem kleinsten vorkommenden Leistungsfaktor aus, z. B. $\cos \Phi = 0.7$, für den die Leistungsmessung um einen ebenso festzulegenden Betrag, z. B. gleichfalls 0,5 % ungenau sein dürfe. Je nach der Verwendung

der Meßtransformatoren wird man diese Prozentsätze bezw. den vorkommenden kleinsten Leistungsfaktor größer oder kleiner veranschlagen. Können die gestellten Bedingungen nicht erfüllt werden, oder nur mit unverhältnismäßig großem Materialaufwand (am Meßtransformator), so bleibt immer noch die Möglichkeit der Anbringung einer Korrektur. — Für $\cos \Phi = 0.7$ und $k = 0.5\ \%$ zulässiger Fehler ergibt sich nach der früher abgeleiteten Formel:

$$k\,\% = \frac{\pi}{108} \operatorname{tg} \Phi \, \psi'$$

$$\psi' = \frac{108}{\pi} \times 0.5 \times 1.02 = 17.5 \text{ Minuten.}$$

Für $\psi = 20$ Minuten ist der prozentuale Wattmeterfehler von folgender Größe:

$\Phi = 0^0$	$\cos \Phi = 1.00$	$k = 0.00\ \%$
10^0	0.985	0.102 „
20^0	0.939	0.212 „
30^0	0.866	0.335 „
40^0	0.766	0.488 ..
50^0	0.643	0.706 ..
60^0	0.500	1.02 ..
70^0	0.342	1.61 ..
80^0	0.174	3.28 %,

nach der genaueren Formel gerechnet:

$$k = \frac{\pm \sin \psi}{\operatorname{cotg} \Phi \mp \sin \psi}$$

für induktive Belastung, also unteres Zeichen. —

Die Firma Siemens & Halske gibt an, daß bei ihren Stromwandlern ψ bei vollem Strom kleiner als 25 Minuten sei. Das Bestreben ψ noch kleiner zu machen, namentlich auch bei kleiner Strombelastung, führt bei Stromwandlern zu bedeutend größeren Konstruktionen, während bei Spannungswandlern in dieser Hinsicht keine Schwierigkeit besteht, solange nicht eine abnorm große Sekundärleistung verlangt wird. Anderseits darf ja ψ bei kleinerer Strombelastung größer werden, da ja der prozentuale Ablesefehler der Instrumente mit Verminderung des Ausschlages gleichfalls zunimmt.

Um p zu verkleinern, hat man ein bequemes Mittel in einer kleinen Vermehrung der primären oder Verminderung der sekundären Windungszahl über das angegebene Umsetzungsverhältnis hinaus.

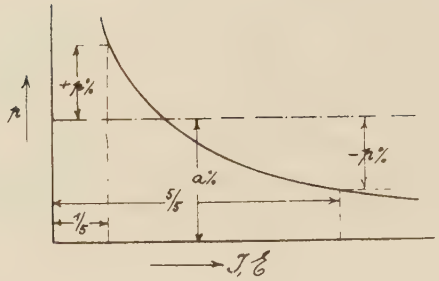


Fig. 71.

Wird z. B. verlangt, daß p von $\frac{1}{5}$ bis $\frac{5}{5}$ des normalen Stromes oder der normalen Spannung nicht mehr als + 0.5 % betrage, so kann dies einmal dadurch erreicht werden, daß p bei $\frac{1}{5}$ Belastung 0.5 % beträgt, bei Vollast ist es dann ohnehin kleiner, weil μ_{max} bei Stromwandlern nie überschritten wird. Oder aber man gleicht die Windungszahlen so ab, daß p bei $\frac{1}{5}$ Belastung + 0.5 %, bei $\frac{5}{5}$ Belastung — 0.5 % beträgt. Das Verhältnis $\frac{w_1}{w_2}$ bei Stromwandlern bezw. $\frac{w_2}{w_1}$ bei Spannungswandlern muß dann um a % vergrößert werden (siehe Fig. 71), sodaß

$$J_1 = J_2 \frac{w_2}{w_1}\left(1 + p_i - \frac{a}{100}\right) \text{ bezw.}$$

$$E_1 = E_2 \frac{w_2}{w_1}\left(1 + p_e - \frac{a}{100}\right) \text{ wird.}$$

Der Fehler am Umsetzungsverhältnis ist = Null, wenn $p = \frac{a_{0/0}}{100}$ ist.

Die Phasenverschiebung δ ändert sich durch diese Abgleichung der Windungszahlen nicht merklich.

Diese Lösung ist exakt eigentlich nur für den Fall zu erhalten, daß p bei $\frac{1}{5}$ Belastung um genau $2 \times 0.5\ \% = 1\ \%$ größer als bei Vollast ist. In der Praxis wird es sich aber nur darum handeln, einen annähernden Abgleich herbeizuführen. Siemens & Halske gleichen ihre Meßtransformatoren, wie sich aus ihren Preislisten erkennen läßt, in dieser Weise ab. Stellt man aber für δ strenge Bedingungen, so kann ein solcher Abgleich für Stromwandler unter normalen Streuungsverhältnissen ($\varphi > \delta$) wegfallen.

Dies geht aus den Gleichungen für p_i und ψ_i hervor:

$$p_i = \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \times C$$

$$\sin \psi_i = \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\sin \varphi \cos \delta} \times C$$

$$\frac{p_i}{\sin \psi_i} = \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\sin(\varphi - \delta)} = \operatorname{cotg}(\varphi - \delta)$$

$$p_i = \sin \psi_i \operatorname{cotg}(\varphi - \delta).$$

Für $\psi_i = 20$ Minuten wird

$$p_i = 0.00582 \times \operatorname{cotg}(\varphi - \delta).$$

Wie groß p_i wird, hängt von dem Winkel $(\varphi - \delta)$ ab. Für kleines δ kann p_i so klein werden, daß ein besonderer Abgleich der Windungszahlen nicht mehr nötig ist.

Über die Grundsätze, die beim Bau von Meßtransformatoren zu beachten sind, läßt sich an Hand der abgeleiteten Gleichungen für p_i und ψ_i bezw. p_e und ψ_e nur eindeutig feststellen, daß eine gute Eisensorte mit hoher Permeabilität μ zu wählen ist und der Ohmsche Widerstand der Transformatorwicklungen klein zu halten ist. Streng genommen soll ϱ_1 und ϱ_2 nur bei Spannungswandlern klein sein, bei Stromwandlern verlangt es die Gleichung nur für ϱ_2. Im Interesse eines geringen Leistungsverbrauches wird man aber auch hier ϱ_1 klein machen. Bei Spannungswandlern ist — induktionsfreie Belastung vorausgesetzt — die durch die Sekundärbelastung verursachte Vergrößerung von p_e direkt proportional den Eigenwiderständen ϱ_1 und ϱ_2. Des weiteren läßt sich noch sagen, daß das Verhältnis $\frac{l}{q}$, der magnetische Widerstand klein sein soll. Eine auf das Eisenvolumen etc. bezügliche Größe kommt in den Gleichungen nicht vor. Den Querschnitt q wird man so wählen, daß die Induktion des Eisens tunlichst nahe den Wert erhält, bei dem die Permeabilität μ ein Maximum wird. Zu sehr darf aber q nicht verkleinert werden, weil dann, um das Kupfer unterzubringen, l wieder vergrößert werden müßte und damit auch $\frac{l}{q}$.

Bezüglich der andern in den Gleichungen vorkommenden Größen lassen sich keine allgemein geltenden Sätze aussprechen. p und ψ nehmen allerdings mit dem Quadrat der Windungszahl ab, aber nur solange die andern Größen, namentlich der Eigenwiderstand ϱ und die Permeabilität μ konstant bleiben. μ nimmt aber unterhalb des

Maximums mit steigender Windungszahl ab, ϱ nimmt — wenn der Kupferaufwand derselbe ist — mit dem Quadrat der Windungszahl zu. Eine Vermehrung der Windungszahl bei gleichbleibendem Kupfergewicht ist also zwecklos. Das Beispiel des Spannungswählers mit $w_1 = w_2 = 80$ Windungen zeigt deutlich, daß sich auch mit kleinen Windungszahlen recht gute Resultate erzielen lassen. Festzulegen, wie groß diese Windungszahl sein soll, kann aber nicht im Rahmen dieser Arbeit liegen, sondern wird dem Konstrukteur überlassen werden müssen.

Von großer Bedeutung ist auch der Winkel δ, oder in letzter Linie die Streuung. Bei Stromwandlern und bei offenen Spannungswandlern tritt mit zunehmender Streuung eine Verbesserung von ψ, aber auch gleichzeitig eine Verschlechterung von p ein, wie sich aus Fig. 7 und 8 unzweideutig erkennen läßt. Ferner ist für Stromwandler aus Fig. 4 zu ersehen, daß bei sehr großem Winkel δ E_{20} und damit p in weiten Grenzen vom Sekundärwiderstand r_2 unabhängig sind. Aus dieser letzteren Erkenntnis heraus entstand offenbar der Stromwandler mit Luftfugen, wie der untersuchte von Siemens & Halske.

Görner kam in einem Vortrag (E.T.Z. 1906, Seite 208) gleichfalls zu dem Schlusse, daß ein Stromwandler große Streuung haben müsse. Wird aber δ auf diese Weise vergrößert, so wird auch φ vergrößert bis auf $80 \div 85^0$. Dies hat zur Folge, daß einmal ψ wieder nicht zu Null wird, zum zweiten, daß der Magnetisierungsstrom erheblich größer und damit die gemischte Permeabilität μ_g kleiner wird.

Die Tatsache, daß Siemens & Halske diese Konstruktion verlassen haben und jetzt nach ihren Angaben „gänzlich geschlossene, stoßfugenfreie Eisenkerne" verwenden, spricht auch dafür, daß das Einfügen von Luftstrecken in den magnetischen Kreislauf zu verwerfen ist. Soll aber doch δ vergrößert werden, so darf dies nur durch besondere Anordnung der Wicklung geschehen.

Für Spannungstransformatoren ist δ nicht von so großer Bedeutung; der Einfluß, den es auf p und ψ ausübt, hängt von der Art und Größe der Belastung ab. Auf jeden Fall wird man es hier vermeiden, daß δ allzu groß wird.

Eine andere Möglichkeit, die Phasenverschiebung ψ bei Stromwandlern herabzudrücken (bei Spannungswandlern wird ψ ja ohnedies sehr klein), wäre die Verkleinerung von φ, um $\varphi - \delta =$ Null zu machen. Dies ist gleichbedeutend mit einer Vergrößerung von J_h oder einer

Vermehrung der Eisenverluste des Transformators. Durch Anwendung von schlechtem Eisen kann dies nicht erreicht werden, weil ja auch dabei μ verkleinert würde. Dagegen können die Eisenverluste durch Verwendung stärkerer oder härterer Bleche vergrößert werden. Eine kleine Verbesserung von ψ' kann auf diese Weise jedenfalls erreicht werden, aber allzu groß darf dieser Vorteil nicht eingeschätzt werden. Am besten können p und ψ' durch Verwendung „legierter" Bleche bedeutend verkleinert werden, weil diese Bleche eine viel höhere Permeabilität haben als gewöhnliches Blech.

VII. Schlußbemerkung.

Das Resultat vorliegender Arbeit besteht darin, Gleichungen aufgestellt zu haben, die für jeden gegebenen Transformator und für jeden Belastungsfall die Ermittlung des Fehlers am Umsètzungsverhältnis und die Abweichung der Phasenverschiebung von 180° zwischen Primär- und Sekundärspannung, bezw. Primär- und Sekundärstrom rechnerisch zu ermitteln gestatten, wenn außer den Dimensionen des Transformators die Permeabilität μ, der Phasenverschiebungswinkel φ und im Kurzschlußdreieck der der Streuspannung gegenüberliegende Winkel δ bekannt sind. Außerdem wurde eine Schaltung angegeben, bei der unter Verwendung eines Phasentransformators beide Fehlergrößen in einfacher Weise gemessen werden können unter Berücksichtigung von eventuell anzubringenden Korrekturen. Ermittelt wurde auch noch der Einfluß der Verwendung von Meßtransformatoren zu Leistungsmessungen und wurden genaue und angenäherte Korrekturformeln hiefür angegeben.